РАЗВИТИЕ ФОТОНИКИ В РОССИИ И МИРЕ

Публичный аналитический доклад

Москва
«Битуби»
2016

УДК [621.383 + 535.14](042.3)
ББК 32.854 + 22.34
Р 17

Руководитель авторского коллектива:
И. Г. Дежина, руководитель группы по научной и промышленной политике, д-р экон. наук, Сколтех

Научные редакторы:
И. Р. Габитов, руководитель Центра фотоники и квантовых материалов, канд. физ.-мат. наук, Сколтех (разделы 4, 5, 6, 7, 8); *В. П. Драчев,* профессор, канд. физ.-мат. наук, Сколтех, доцент, Университет Северного Техаса (разделы 4, 5, 6, 7); *П. С. Дорожкин,* главный науч. сотр. канд. физ.-мат. наук, Сколтех (раздел 4); *А. А. Романов,* главный конструктор направления, зам. директора проектов, д-р техн. наук, АО «Российские космические системы» (раздел 6); *И. Г. Дежина,* руководитель группы по научной и промышленной политике, д-р экон. наук, Сколтех (разделы 1, 2, 3, Приложение).

Список авторов:
И. Г. Дежина, руководитель группы по научной и промышленной политике, д-р экон. наук, Сколтех (разделы 1, 2, 3, Приложение); *А. К. Пономарев,* вице-президент по стратегии и связям с индустрией, канд. техн. наук, Сколтех (введение, раздел 8, заключение); *А. С. Фролов,* аналитик по промышленной политике, Сколтех (разделы 1, 2, 3); *И. Р. Габитов,* руководитель Центра фотоники и квантовых материалов, канд. физ.-мат. наук, Сколтех (раздел 8, заключение); *А. Г. Насибулин,* профессор, д-р техн. наук, Сколтех (раздел 4.5); *В. П. Драчев,* профессор, канд. физ.-мат. наук, Сколтех, доцент, Университет Северного Техаса (разделы 4.2, 7); *В. В. Перебейнос,* профессор, канд. физ.-мат. наук, Сколтех (раздел 4.4); *А. Л. Вятских,* аспирант, Сколтех (раздел 4.5); *Д. А. Горин,* профессор, д-р хим. наук, Саратовский государственный университет (раздел 7); *С. В. Иванов,* профессор, д-р физ.-мат. наук, ФТИ им. А. Ф. Иоффе (раздел 4.1); *С. М. Кобцев,* директор, д-р физ.-мат. наук, ЗАО «Техноскан» (раздел 4.6); *С. А. Козлов,* профессор, д-р физ.-мат. наук, НИУ ИТМО (раздел 5.2); *Н. А. Малеев,* ст. научн. сотр. канд., физ.-мат. наук, ФТИ им. А. Ф. Иоффе (раздел 4.1); *О. Е. Наний,* профессор, начальник научно-исследовательского отдела, д-р физ.-мат. наук, МГУ им. М. В. Ломоносова, ООО «Т8» (раздел 5.1); *Н. В. Никоноров,* профессор, д-р физ.-мат. наук, НИУ ИТМО (раздел 4.3); *А. А. Романов,* главный конструктор направления, зам. директора проектов, д-р техн. наук, АО «Российские космические системы» (раздел 6); *А. А. Романов,* зам. ген. директора по науке, д-р техн. наук, АО «Российские космические системы» (раздел 6); *В. Л. Семененко,* научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук, Сколтех (раздел 4.4); *А. В. Устинов,* профессор, д-р физ.-мат. наук, Технологический институт Карлсруэ / НИТУ «МИСиС» (раздел 5.4); *С. С. Харинцев,* доцент, канд. физ.-мат. наук, Казанский федеральный университет (раздел 5.3); *А. В. Шипулин,* профессор, д-р физ.-мат. наук, Технический университет Дармштадта (раздел 5.1);

Технический редактор: *В. Е. Пригарин.*

Развитие фотоники в России
Р 17 **и мире** : публичн. аналит. доклад.— М.: Битуби, 2016.— 432 с. : ил.

ISBN 978-5-9909093-0-4

Исследование подготовлено на основе научно-исследовательской работы, выполненной при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (уникальный идентификатор научно-исследовательской работы RFMEFI60315X0011).

УДК [621.383 + 535.14](042.3)
ББК 32.854 + 22.34

ISBN 978-5-9909093-0-4

© АНОО ВПО «Сколковский институт науки и технологий», 2016

Содержание

Введение **5**

1. Фотоника на мировом рынке **11**

2. Зарубежный опыт поддержки исследований и разработок в области фотоники **19**
2.1. США 19
2.2. ЕС 23
2.3. Япония 25
2.4. Южная Корея 27
2.5. Китай 27

3. Российский опыт поддержки исследований и разработок в области фотоники **30**
3.1. Рынки и оценка потенциала 30
3.2. Государственная поддержка исследований и разработок 34

4. Оптические материалы, структуры и источники **42**
4.1. Полупроводниковые системы 42
4.2. Оптические межсоединения и кремниевая нанофотоника 76
4.3. Оптическое стекло и стеклокерамика 94
4.4. Двумерные кристаллы для фотоники и оптоэлектроники 106
4.5. Однослойные углеродные нанотрубки в фотонике и оптоэлектронике 117
4.6. Спектрально-прецизионные лазеры 141

5. Информация: передача, обработка, хранение и защита 151
5.1. Волоконные оптические линии связи 152
5.2. Квантовые методы передачи информации 197
5.3. Оптические методы хранения информации 228
5.4. Квантовые компьютеры и симуляторы, контроль квантовых состояний 270

6. Фотонные технологии для космических приложений 287
6.1. Оптические системы космической связи 288
6.2. Технологии фотоники для спутниковой навигации 302

7. Биомедицинские приложения фотоники 325
7.1. Биомедицинские сенсоры и системы визуализации высокого разрешения 326
7.2. Системы адресной доставки лекарств, фототерапии и хирургии 339

8. Возможные сценарии развития и использования технологий фотоники 349

Заключение 354

Приложение. Некоторые мнения представителей научного сообщества о направлениях поддержки фотоники в России 356

Список использованных источников 365

Введение

Проявившиеся в последние годы технологические тренды позволяют прогнозировать возможность решения принципиально новых, значимых для развития цивилизации, задач в ближайшие 10–20 лет. Ключевые технологии, объединяющие этот набор задач, связаны с алгоритмическими и физическими прорывами в области передачи и обработки больших массивов данных.

Новые технологии работы с большими массивами данных стимулируют сбор и накопление разнообразной информации для более точного прогнозирования поведения различных систем. При этом, сдерживающим фактором при использовании таких данных становятся физические ограничения электронных систем. Математические направления в категориях «Большие данные» и «Искусственный интеллект» сегодня достаточно полно описаны и систематизированы. С другой стороны, область физических технологий передачи и обработки информации, ориентированных на повышение быстродействия при снижении энергопотребления и энерговыделения, дальнейшую миниатюризацию, надежность и стойкость к внешним (например, космическим) воздействиям, представляется еще недостаточно структурированной, тем более, что для широкого круга перспективных приложений скачок в производительности, надежности, энергопотреблении систем получения, обработки и хранения информации является принципиальным.

Важнейшим трендом последних лет является последовательное продвижение фотонных (оптических) технологий из внешней по отношению к устройствам обработки информации среды «вглубь» компьютерных систем.

Если конец XX–начало XXI века характеризовались бурным развитием оптоволоконных линий связи, то текущее десятилетие отмечено активной разработкой оптических компонентов компьютерной техники. Создаются межчиповые оптические интерконнекторы и оптические контроллеры, сдвигающие начало электронной обработки сигнала все дальше вглубь компьютерных систем, ведется разработка оптических и «квазиоптических» переходов внутри чипов.

Множество компаний, финансируемых основными конкурентами в производстве компьютерной техники, постоянно продвигаются в создании оптических, оптоэлектронных блоков в современных системах, ориентируясь на постепенное повышение их эффективности путем модернизации, но пока еще не создания принципиально новых устройств. Так, первые оптоэлектронные контроллеры, ориентированные на промышленное применение, разрабатываются исходя из задачи обеспечить не менее 100 ГБ/с на канал, перспективные работы уже ориентируются на 1 ТБ/с.

Параллельно развиваются собственно «квантовые технологии», обещающие, хотя и не очень скоро, следующий скачок в производительности, уже в новой математической парадигме. Но уже в ближне- и среднесрочной перспективе, квантовые технологии позволят существенно изменить представления о возможностях защиты систем передачи информации.

О каких задачах и о каких масштабах обработки данных идет речь?

Во-первых, это довольно давно осуществляемая, но далекая от завершения общецивилизационная «операция» по созданию «информационного поля» над земной поверхностью, в зоне человеческой активности.

Попытка узнать все больше и больше о происходящем в пространстве от земной поверхности до верхних слоев атмосферы осуществляется в интересах:

- управления движением транспортных средств (воздушных, морских, наземных);

- прогнозирования погоды, включая предупреждение и противодействие чрезвычайным ситуациям, точное земледелие, безопасность на транспорте;
- экологии;
- противовоздушной и противоракетной обороны.

В последнее время в ряде этих областей достигнуты существенные успехи в создании прототипов конечных продуктов, включая:

- «беспилотные» транспортные средства;
- комплексы точной обработке посевов;
- системы поиска и спасения;
- системы мониторинга окружающей среды;
- новые военные системы.

Вместе с тем, в большинстве случаев развитие тормозится именно ограничениями, связанными с объемом информации, который необходимо передавать и обрабатывать в реальном времени, в рамках геометрических и весовых ограничений.

Во-вторых, это системы обработки биологических данных, на новом витке попыток:

- включить информацию о геномных (протеомных) процессах в медицинскую практику;
- разобраться и научиться влиять на процессы в мозге человека.

В обоих случаях необходимость наблюдения за большим объемом данных, а в случае работы с нейротехнологиями — еще и в реальном масштабе времени, предъявляют требования к скорости передачи и обработки, на порядки превышающие доступные в настоящее время.

В-третьих, смена парадигмы материального производства, получение первых технологических возможностей для высокого уровня кастомизации сложных технических продуктов и децентрализации производства, постепенно, но уверенно, влечет кардинальное повышение требований к системам проектирования, моделирования, информационного обеспечения нового поколения производственных процессов.

В-четвертых, человечество снова начинает интересоваться коллективными социально-экономическими процессами, моделированием цивилизационных кризисов, интеграцией

психологических, экономических, технологических факторов при анализе происходящих макропроцессов в человеческом обществе.

Это, в свою очередь, ставит задачи интеграции и обработки больших объемов данных для практических применений (например, для выявления и предотвращения социальных кризисов, с ограничениями по времени обработки данных).

И, наконец, в-пятых, во многих областях науки усиливается внимание к обработке данных. Это и астрофизика (с практическими приложениями по вопросам космических угроз для Земли), и новое поколение работ по строению материи, а также фундаментальные работы по развитию биологических объектов.

Значение развития оптических и оптоэлектронных технологий для российской экономики

Россия практически пропустила этап развития современной вычислительной техники. Отдельные системы, выпускаемые для специальных целей, также требуют импортных комплектующих, и явно неконкурентоспособны за пределами чисто военных контрактов.

Представляется, что в сфере фотоники в России сегодня очень сложно двигаться в направлении разработки блоков для модернизации современной техники.

В то же время, закладывая системы новой архитектуры, опираясь на наличие некоторого объема компетенций в оптических и квантовых технологиях, есть шанс войти в международную кооперацию, с концентрацией в России нескольких ключевых технологий для создания на их основе соответствующих центров компетенций.

На каких направлениях развития следующего поколения оптической и оптоэлектронной техники мы можем сосредоточится, где сконцентрировать усилия (кадры, инвестиции), какова может быть структура международной кооперации с частием российских разработчиков и производителей, как стимулировать науку и бизнес в этой сфере,— на наш взгляд, эта та система вопросов, ответы на которые необходимо искать, опираясь на анализ научных, технологических и экономических проблем, связанных с развитием обсуждаемой сферы.

Требования

В настоящее время бурное развитие методов обработки больших данных уже начинает тормозиться ограничениями вычислительных устройств и систем передачи информации. Для практического применения большинства из перечисленных технологий критически важными становятся:

- надежность передачи данных, причем, в ряде случаев, вне специализированных физических каналов (оптоволокно, волноводы, провода): в атмосфере, в различных физических средах производственных процессов, в биологических средах;
- помехозащищенность как в отношении естественных факторов, так и в условиях недружественных вмешательств;
- габариты (геометрические и массовые) сенсоров, приемопередающих и обрабатывающих устройств. Это, в различных масштабах и технологиях, важно для работы транспортных систем, контроля производственных процессов, для работы с биологическими объектами;
- соответствие физических устройств уровню развития математических методов обработки информации;
- скорость обработки (судя по передовым зарубежным работам, речь уже идет о единицах, а в дальнейшем и о десятках Терабит в секунду на один канал);
- энергопотребление (энерговыделение) должно быть снижено по крайней мере на 2–3 порядка по сравнению с современными электронными устройствами.

Целью настоящей работы является воссоздание многомерной картины развития и интеграции широкого круга научных направлений и технологий, необходимых и достаточных (хотя бы в основном) для создания прототипов, и, далее, коммерческих систем передачи и обработки информации для решения указанных задач в соответствии с означенными требованиями.

Технологическими граничными условиями для создания таких систем могут быть приняты соображения о динамике развития математических методов обработки информации, прогнозе развития сенсорных систем.

В работе ставились следующие задачи:

- показать место фотоники в России и мире, включая текущие и перспективные рынки, проанализировать зарубежный и российский опыт государственной поддержки данного направления;
- дать структуры технологий фотоники, интеграция которых ведет к созданию физических устройств и «программно-аппаратных» комплексов на их основе;
- показать наиболее реалистичные и более «экзотические» направления их развития;
- оценить необходимую динамику улучшения характеристик рассматриваемых технологий, уровни характеристик, необходимые для интеграции при создании коммерческих образцов;
- проанализировать ход работ по этим технологиям за рубежом и в России;
- оценить уровень развития научных и технологических направлений фотоники в России на основе библиометрического и патентного анализа;
- сформировать предложения для развития рассматриваемого направления в России, с учетом действующих технологических, кадровых, финансовых и иных ограничений.

Доклад состоит из двух основных частей. Первая включает анализ экономических показателей развития фотоники в России и мире, а также зарубежный и российский опыт государственной поддержки данного направления.

Во второй части описаны перспективные направления развития фотоники, включая технико-технологические характеристики разных областей. Все многообразие направлений структурировано по четырем основным группам: материалы и структуры фотоники, информационные, космические и биомедицинские приложения фотоники.

Доклад завершается сценариями развития и использования технологий фотоники.

1. Фотоника на мировом рынке

ФОТОНИКА представляет собой обширную совокупность различных рынков, так или иначе использующих фотонные технологии. Выделяют «базовые» рынки, непосредственно связанные с фотонными компонентами, и «вертикальные», развитие которых обусловлено использованием различных технологий фотоники — это информационные технологии, биофотоника, передовое производство, оборона и безопасность, освещение и энергетика. При этом фотоника, как таковая, не является объектом статистического наблюдения официальных государственных ведомств ни в одной из развитых стран. Рынки фотоники включены в разные группировки как в статистике национального производства, так и в статистике внешнеторговой деятельности.

Основная информация о структуре и динамике рынков в мире и по отдельным странам собирается и анализируется различными некоммерческими ассоциациями и специализированными консалтинговыми компаниями. Так, например, информацию о динамике и структуре мирового рынка фотоники публикуют такие организации, как Американская ассоциация оптоэлектронной промышленности (Optoelectronic Industry Development Association — OIDA), Ассоциация немецких машиностроителей (Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. — VDMA), тайваньская ассоциация развития фотонной промышленности и технологий (Photonics Industry&Technology Development Association — PIDA). Среди специализирующихся на фотонике консалтинговых компаний можно выделить Optech Consulting, Tematys, Yole Développement и Strategies Unlimited.

Отдельно стоит упомянуть Международное сообщество оптики и фотоники (The international society for optics and photonics — SPIE). В докладе «Оптика и фотоника: ключевые технологии для нашей нации» (Optics and Photonics: Essential Technologies for our Nation [1.1] состояние сбора данных о расходах на НИОКР, занятости и продажах в области фотоники в США было охарактеризовано как «прискорбное». Так, Северо-Американская система классификации промышленности (North American Industry Classification System — NAICS) не включает отдельного кода, объединяющего информацию по фотонике. Производители оптических и фотонных компонентов в США используют более 250 кодов NAICS для отражения своей продукции в статистике [1.2]. После этой публикации SPIE запустила проект по регулярным исследованиям фотонной индустрии по всему миру [1.3]. Отличительной особенностью данного проекта является то, что информация о фотонных рынках собирается на основе микроуровневых исследований — эксперты SPIE собирают информацию о компаниях, участвовавших в различных тематических выставках, связанных с фотонными технологиями, по всему миру.

OIDA регулярно издает обзоры мирового рынка фотоники, в том числе по отдельным его сегментам. Доступ к полным версиям докладов открыт только для промышленных партнеров (industry membership) [1.4]. По оценкам OIDA мировой рынок фотоники в 2014 г. достиг объема в 480 млрд. долл. (+6% к 2013 г.) (Рисунок 1.1). Прирост на 6% отражает продолжающееся восстановление рынка после спадов в 2009 г. и 2012 г. (Рисунок 1.1).

В отраслевой структуре основную долю занимают дисплеи, фотовольтаика и освещение. К странам-лидерам относятся Япония и США, за которыми следуют Южная Корея, Европа, Тайвань и Китай (Рисунок 1.2).

По данным доклада «Фотоника. Отчет по промышленности. 2013» (Photonics. Industry Report. 2013), опубликованного совместно Немецким федеральным министерством образования и исследований (German Federal Ministry of Education and Research — BMBF) и промышленными ассоциациями **VDMA**, Spectaris и ZVEI [1.7], объем мирового рынка фотоники в 2011 г. оценивался приблизительно в 350 млрд. евро

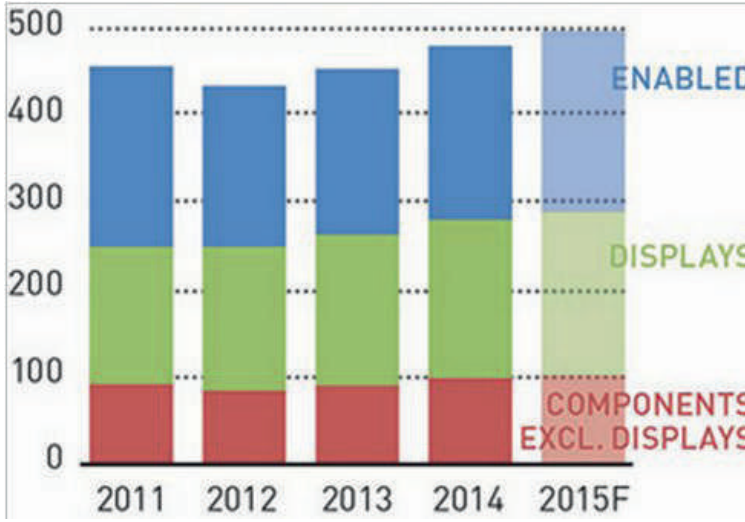


Рисунок 1.1 — Динамика и структура мирового рынка фотоники по оценкам OIDA (млрд.долл.)

Источник: [1.5]

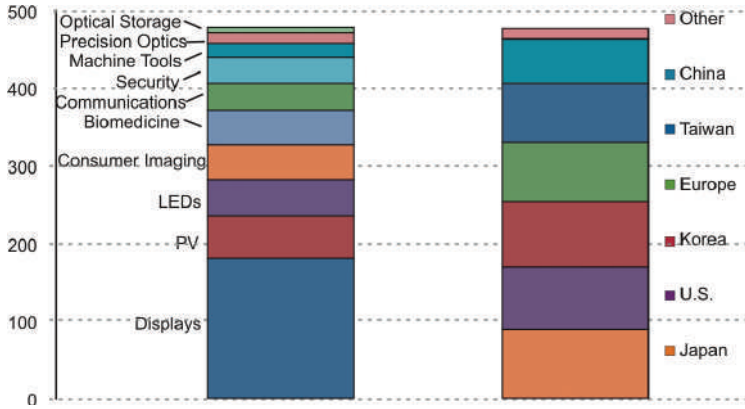


Рисунок 1.2 — Отраслевая и региональная структура мирового рынка фотоники по оценкам OIDA (млрд. долл.)

Источник: [1.6]

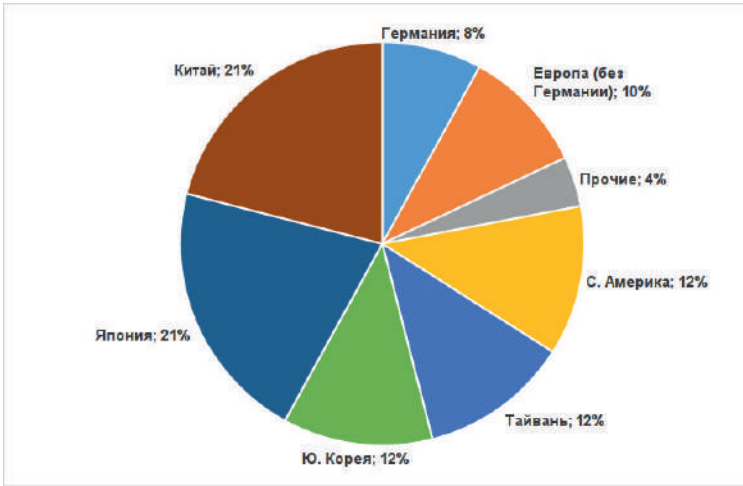


Рисунок 1.3 — Структура производства продукции фотоники в мире (по данным за 2011 г.)

Источник: [1.7]

(486 млрд. долл.) Среднегодовой темп прироста мирового рынка фотоники в период 2005–2011 гг. составлял порядка 7,4%. По прогнозам в 2011–2020 гг. среднегодовой темп прироста несколько снизится — до 6,4%, иа объем к 2020 г. составит около 615 млрд. евро.

Основными центрами производства продукции являются Япония, Китай, Южная Корея, Тайвань, Германия, Северная Америка (Рисунок 1.3). Наибольший прирост в объеме производства продукции фотоники в 2005–2011 годах. наблюдался в Китае (более чем в 3 раза), Германии (в 1,6 раз), Южной Корее (в 1,5 раза), на Тайване (в 1,5 раза).

Наиболее крупные сегменты мирового рынка фотоники связаны с IT-сектором и энергетикой. Так, на долю дисплеев, IT и коммуникационных технологий в 2011 г. приходилось около 47% рынка, а на долю фотовольтаики — 14% (Таблица 1.1).

По темпам прироста в 2005–2011 гг. лидировали сегменты фотоники, связанные с производственными и оборонными технологиями. В 2011–2020 гг., согласно прогнозу, наиболее высокие темпы прироста будут наблюдаться в области техно-

Таблица 1.1 — Структура мирового рынка фотоники

Сегменты мирового рынка фотоники	2005	2011	2020
Дисплеи	27%	25%	23%
Информационные технологии	21%	17%	15%
Фотовольтаика	4%	14%	16%
Измерения и машинное зрение	8%	8%	9%
Безопасность и оборона	8%	7%	7%
Медицина и науки о жизни	8%	7%	7%
Производственные технологии	6%	6%	7%
Источники света	8%	6%	6%
Оптические компоненты и системы	5%	5%	6%
Коммуникационные технологии	5%	5%	4%

Источник: [1.7]

логий, важных для развития производства, обороны и энергетики.

Можно отметить наличие существенной специализации стран на определенных сегментах рынка фотоники. Так, Тайвань, Южная Корея, Япония и Китай специализируются на таких рынках массовой продукции, как дисплеи, освещение и фотовольтаика. США, европейские страны, а также Япония, в большей степени специализируются на менее массовых и более высокотехнологичных сегментах, таких как оптические компоненты, измерения и машинное зрение, оборона и безопасность, медицина и науки о жизни, производственные технологии. Сегменты коммуникаций и ИТ развиваются как в передовых азиатских, так и в европейских странах и США (Рисунок 1.4).

По оценкам тайваньской фотонной ассоциации **PIDA**, объем мирового рынка фотоники в 2014 г. составил 577 млрд. долл. (прирост на 6% относительно 2013 г.). По прогнозу PIDA мировой рынок фотоники к 2017 г. вырастет до 724 млрд. долл. (Рисунок 1.5). Основной объем выручки в 2014 г. пришелся на дисплеи (32%), фотовольтаику (29%), биофотонику (16%) и LED и освещение (8%). К 2017 г. ожидается существенный рост доли фотовольтаики (до 34%) и LED и освещения (до

10%) при снижении доли дисплеев (до 29%) и биофотоники (до 14%).

В целом SPIE оценивало мировой рынок фотоники в 2014 г. на уровне 480 млрд. долл. с прогнозом роста до более чем 600 млрд. долл. в 2020 г. [1.9].

Микроуровневые исследования начались с изучения информации о компаниях-участниках выставки Photonics West в сегменте базовых фотонных компонентов. Анализ показал, что в 2012 г. 1008 компаний с общей численностью занятых более 337 тыс. чел. работали в сфере базовых фотонных компонентов, и имели выручку 84 млрд. долл. Далее были сделаны оценки сегмента базовых фотонных компонентов по всему миру. Результаты были опубликованы в 2013 г. и они показали, что всего работает 2748 фирм с общей численностью занятых 700 тыс. чел. и выручкой 156 млрд. долл.

Методологически исследования были построены следующим образом:

- были определены более 30 отраслевых событий (выставок, конференций и проч.), относящихся к оптике или фотонике и прошедших в 2012 г. в различных странах мира и на этой основе составлена база данных организаций, участвовавших хоть в одном из этих событий. Всего было выявлено 4962 организации;
- из общего списка организаций были исключены образовательные институты, государственные лаборатории, медиа-издания, консалтинговые фирмы, ассоциации и некоммерческие организации, а также дистрибьюторы — осталось 2748 компаний;
- при посредничестве компании Dun & Bradstreet были собраны данные по продажам и занятости в этих компаниях;
- группа аналитиков SPIE провела углубленный анализ компаний. Выручка и занятость у компаний учитывались в той пропорции, в которой для данной компании характерен объем продаж продукции, относящейся к фотонике («Фотонный фактор»). Для компаний с выручкой менее 10 млн. долл. «Фотонный фактор» принят за 100%.

В итоге общий объем рынка базовых фотонных компонентов был оценен в 182 млрд. долл. Число «активных» компаний

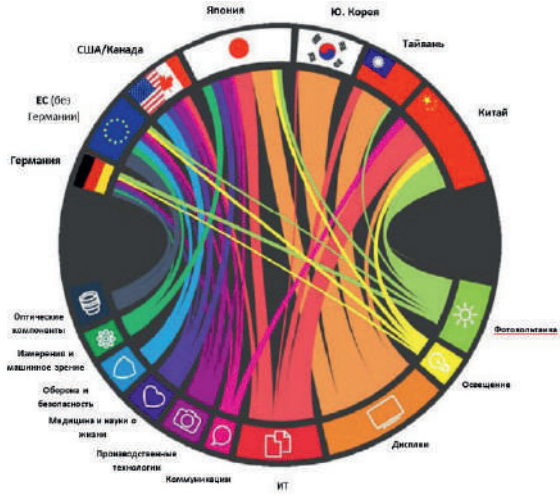


Рисунок 1.4 — Соотношение региональной и отраслевой структуры мирового рынка фотоники.

Источник: [1.6]

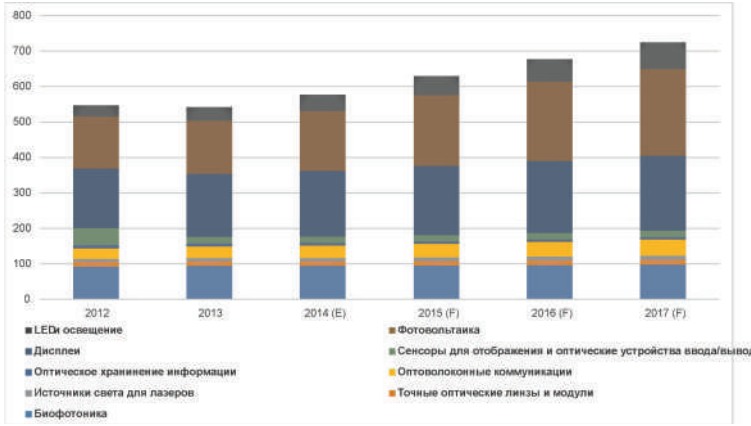


Рисунок 1.5 — Оценки и прогноз мирового рынка фотоники по данным PIDA

Источник: [1.8]

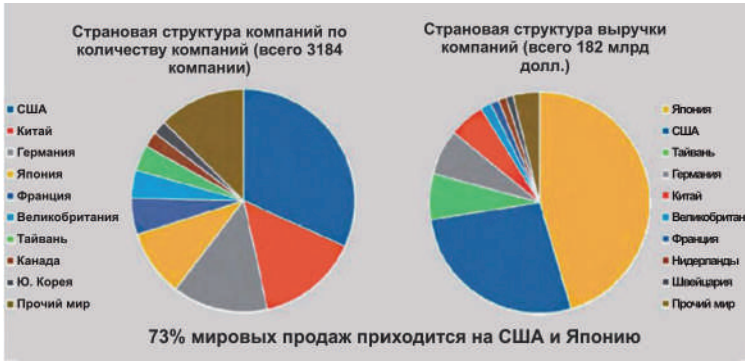


Рисунок 1.6 — Страновое распределение компаний, включенных в анализ SPIE, по количеству и по выручке

Источник: [1.10]

(т. е. компаний, участвующих в различных выставках) выросло до 3194, а занятость на них выросла до 863 тыс. чел. [1.10]

Почти s всех выявленных компаний относятся к категории МСП — их годовая выручка составляет менее 10 млрд. долл. На 2384 компании приходится лишь 4% общей выручки, в то же время 63 крупнейшие компании генерируют 70% выручки. Около 60% малых компаний (с выручкой до 10 млн. долл.) работают уже более 10 лет.

Основное число компаний, включенных в анализ SPIE, размещено в США, Китае и Германии. По размерам выручки лидируют компании из Японии и США (Рисунок 1.6). В дальнейшем SPIE планирует изучать рынки, использующие фотонные технологии (photonic-enabled). Так, в апреле 2015 г. были опубликованы результаты исследования, посвященного рынкам биофотоники [1.10]

В следующем разделе будет рассмотрен зарубежный опыт поддержки фотоники.

2. Зарубежный опыт поддержки исследований и разработок в области фотоники

2.1. США

В США государственная поддержка исследований в области фотоники имеет долгую историю. Еще в 1950-е гг. начались исследования по лазерам, финансируемые из средств оборонных программ, и, вплоть до 1980-х. гг. государство было основным источником финансирования исследований в области лазеров [2.1]

В 1988 г. Национальный исследовательский совет (National Research Council — NRC) подготовил исследование «Фотоника: поддерживая конкурентоспособность в эру информационных технологий» («Photonics: Maintaining Competitiveness in the Information Era») [2.2], в котором было рекомендовано создать отраслевую ассоциацию для повышения конкурентоспособности американских компаний, работающих в области оптики и фотоники, и инициировать совместные исследовательские проекты. В ответ на эту рекомендацию в 1991 г. была учреждена Ассоциация развития оптоэлектронной промышленности (OIDA), которая подготовила дорожную карту и активно взаимодействовала с государственными ведомствами, лоббируя выделение средств на исследования в области фотоники. Однако специальных мер поддержки фотоники введено не было. Финансирование исследований в этой области осуществлялось через ряд программ (иногда краткосрочных), в первую очередь таких ведомств, как DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency — Агентство по перспективным оборонным научно-исследовательским разработкам США), Национальный научный фонд США (NSF) и Национальный институт стандартов и технологий (NIST).

Через десять лет, в 1998 г., появился подготовленный Национальным исследовательским советом следующий доклад — «Освоение света: оптическая наука и техника в 21 веке» («Harnessing Light: Optical Science and Engineering for the 21st Century») [2.2]. Причина появления нового доклада — попытка привлечь внимание к фотонике как перспективной области. В докладе были даны рекомендации различным ведомствам (DARPA, Национальному институту здоровья, Министерству энергетики, Министерству обороны и др.) по формированию новых тематических приоритетов в области оптики, наращиванию их финансирования и усилению координации. Однако и этот доклад не стал руководством к действию, что впоследствии с сожалением отмечали американские эксперты[1]. Соответствующие ведомства не выделили фотонику в качестве приоритета, не говоря уже об общефедеральном уровне [2.3]. Парадоксально, что на доклад обратили больше внимания за пределами США: в ЕС фотоника была признана важной обеспечивающей технологией и образована платформа «Фотоника 21». В некотором смысле ЕС оказался более удачливым бенефициаром идей, изложенных в американском докладе.

После кризиса высокотехнологичных рынков в 2000–2001 гг. американские компании стали переводить производства в Китай, Тайвань и другие азиатские страны [2.4], а венчурные инвестиции в фотонику в 2004 г. упали на ⅔ по сравнению с 2000 г. [2.5]. Последствием переноса производственных мощностей, стало, во-первых, сокращение масштабов применения технологий фотоники в США [2.4], во-вторых, формирование глобальных технологических компаний в Китае (Huawei, ZTE), которые стали постепенно вытеснять американцев с мировых высокотехнологичных рынков. Однако и эти события не повлекли за собой каких-

[1] Интервью И. Дежиной с Джеральдом Фрейзером (Gerald Fraser), Chief of Sensor Science Division, NIST, and co-chair of the Fast-Track Action Committee on Optics and Photonucs, 21 сентября 2015 г., и Лоуренсом Голдбергом (Lawrence Goldberg), Senior Engineering Advisor, Electrical, Communications, and Cyber Systems Division, National Science Foundation 21 сентября 2015 г.

либо специальных действий со стороны правительства по поддержке фотоники.

Интерес правительства к теме поддержки фотонике появился только после начала мирового экономического кризиса 2008–2009 гг. Благодаря усилиям Комитета национальных академий (The National Academies' committee) в 2012 г. был подготовлен доклад «Оптика и фотоника: ключевые технологии для нашей нации» (Optics and Photonics: Essential Technologies for our Nation), в котором был дан комплексный обзор состояния исследований в фотонике и обоснована необходимость усиления их государственной поддержки. В то же время доклад не был четко адресован правительству, поэтому и эта инициатива не оказала ожидаемого влияния в государственных масштабах. Вместе с тем некоторые положения доклада были реализованы. В частности, в нем было рекомендовано организовать «Национальную инициативу в области фотоники» (National Photonics Initiative — NPI), которая в дальнейшем действительно была создана. Следует отметить, что NPI не имеет отношения к правительственным инициативам и не финансируется государством. Она была создана по инициативе американских научных обществ и компаний, для подготовки рекомендаций по развитию фотоники. Объединяющую роль в создании NPI взяли на себя 5 некоммерческих организаций: Оптическое общество (OSA), Международное общество оптики и фотоники (SPIE), Общество фотоники института инженеров по электрике и электронике (the IEEE Photonics Society), Американский лазерный институт (the Laser Institute of America) и Отдел лазерных наук американского физического сообщества (the APS's Division of Laser Science) [2.3]. Помимо NPI была организована еще одна структура — Комитет быстрого реагирования по оптике и фотонике (Fast-Track Action Committee on Optics and Photonics — FTAC-OP), куда вошли уже представители различных государственных ведомств. В апреле 2014 г. FTAC-OP обнародовал доклад, в котором были обозначены приоритеты поддержки исследований в области фотоники — «Создавая яркое будущее с оптикой и фотоникой» («Building a Brighter Future with Optics and Photonics») [2.6]. В докладе делался акцент на фундаментальные исследования, так как именно они, по мнению авторов, должны поддерживаться

правительством [1]. Из этого доклада ясно следует, что фотоника утвердилась в качестве «поддерживающего» направления, обеспечивая развитие приоритетных на федеральном уровне направлений, (к таковым относятся инициативы — BRAIN, перспективные производственные технологии, «большие данные», геном). Несмотря на многообразие попыток привлечь внимание правительства к фотонике, фактическая поддержка этой области в США осуществляется в рамках традиционных программ ведомств, с использованием привычных инструментов — от грантовых программ Национального научного фонда (NSF) до контрактов.

Исключением стало создание под эгидой Министерства обороны специализированного Института интегральной фотоники для инноваций в области производственных технологий (Integrated Photonics Institute for Manufacturing Innovation — IP-IMI), в рамках национальной сети промышленных инноваций (National Network for Manufacturing Innovation). О запуске конкурса на его создание объявил в октябре 2014 г. президент США Барак Обама. IP-IMI должен быть нацелен на преодоление проблем, характерных для периода «долины смерти» (“valley of death”), который начинается от лабораторных исследований и завершается промышленным запуском новых технологических продуктов. Помимо этого, новый институт призван играть важную роль в подготовке технических кадров для компаний, работающих в области фотоники [2.7], с целью устранения дефицита технических специалистов. Так, согласно исследованию OP-TEC, проведенному в 2012 г., в США сохраняется значительный разрыв между спросом на новых технических специалистов и количеством выпускников 2-летних программ технических специалистов в области фотоники [2.8].

Конкурс на создание института выиграл Государственный университет Нью-Йорка (State University of New-York — SUNY) [2.9] в составе консорциума из 75 организаций, включая ком-

[1] Интервью И. Дежиной с Джеральдом Фрейзером (Gerald Fraser), Chief of Sensor Science Division, NIST, and co-chair of the Fast-Track Action Committee on Optics and Photonucs, 21 сентября 2015 г.

пании, некоммерческие организации и университеты. Институт уже привлек беспрецедентное финансирование: по данным на сентябрь 2015 г. из федерального бюджета было выделено 110 млн. долларов, а промышленность софинансирует его работу в размере 503 млн долларов [1].

Таким образом, несмотря на то, что важность развития фотоники была отражена в значительном числе документов, в том числе адресованных правительству США, фотоника не вошла в число национальных технологических приоритетов, но была признана в качестве технологии, обеспечивающей развитие стратегических областей, таких, как большие данные, исследования мозга, разработка новых производственных технологий. В продвижении исследований по фотонике растущую роль стали играть альянсы научных обществ с промышленными компаниями.

2.2. ЕС

В странах ЕС приоритетность фотоники резко возросла после мирового экономического кризиса 2008–2009 гг., который привел к формированию новой идеологии экономического развития, базирующейся на необходимости реиндустриализации ЕС для поддержания устойчивой конкурентоспособности европейских экономик [2.10].

Государственная политика, направленная на поддержку исследований в области фотоники в 2000-е гг., эволюционировала в сторону усиления кооперации. Так, еще в конце 1990–начале 2000-х гг. начался процесс формирования кластеров в области фотоники [2.11]. В 2003 г. 5 европейских компаний, организовали Европейский промышленный консорциум в области фотоники (European Photonics Industry Consortium), а в 2005 г. для улучшения координации в ЕС была создана европейская технологическая платформа (ТП) «Фотоника21» (European Technology Platform “Photonics21”).

[1] Источник: Интервью И. Дежиной с Фрэнком Гейлом (Frank Gayle), Deputy Director of the Advanced Manufacturing National Program Office (AMNPO), NIST, 21 сентября 2015 г.



Рисунок 2.1 — Структура участников Европейской технологической платформы «Фотоника21»

Источник: [2.12]

В настоящее время в состав ТП «Фотоника21» входит более 2000 тысяч участников, среди которых почти половину составляют исследовательские организации (Рисунок 2.1).

Для поддержки развития промышленности на основе новой технологической базы в 2009 г. Еврокомиссия предложила 6 ключевых обеспечивающих технологий (key enabling technologies — KET), в число которых вошла и фотоника [2.13]. Получение фотоникой статуса KET означало, что она становится одним из приоритетных направлений в 8-й программе ЕС Horizon-2020. В 2013 г. был сделан следующий шаг в развитии фотоники на базе ТП «Фотоника21»: подписано соглашение с Европейской Комиссией (ЕК) о государственно-частном партнерстве (ГЧП) [2.14], в рамках которого стороны взяли на себя долгосрочные обязательства по финансированию фотоники в течение действия рамочной программы

Horizon 2020 [2.12]. Характерно, что в данном случае, как и в США, расходы частного сектора на финансирование фотоники существенно превышают бюджетные ассигнования. Европейская Комиссия выделит 700 млн. евро, а обязательства частного бизнеса составили вчетверо большую сумму — 2,8 млрд. евро [2.15].

В рамках ГЧП предполагается наладить систему поддержки исследований и разработок вплоть до выхода на производство, не ограничиваясь стадией создания прототипов [2.16]. В функции ГЧП входит также выбор исследовательских приоритетов и их согласование с ЕК в рамках Horizon 2020. Для решения этой задачи в 2013 г. была подготовлена Стратегическая дорожная карта развития фотоники в ЕС до 2020 г. (Towards 2020 — Photonics Driving Economic Growth in Europe) [2.17].

ЕК контролирует деятельность ГЧП на основе количественных и качественных индикаторов. К количественным относятся, например, рост числа специалистов в области фотоники, рост доли европейских компаний на мировом рынке фотоники. Качественные показатели — это, например, истории успеха, связанные с ключевыми проектами в фотонике, финансировавшимися в рамках Horizon 2020 (технологические прорывы, патенты и изменения в стандартах), а также повышение информационной открытости (широкое распространение информации и примеров о том, как технологии фотоники влияют на уровень жизни в странах ЕС).

Таким образом, на уровне ЕС фотоника так же, как в США, признана обеспечивающей технологией, но для ее поддержки введены специальные инструменты государственно-частного партнерства.

2.3. Япония

Япония является одним из мировых лидеров в области фотоники. Особенность данной страны состоит в том, что основным источником средств для развития фотоники был и остается бизнес-сектор, поскольку государственное финансирование исследований и разработок в Японии очень незначительное. Государство преимущественно использует меры

косвенного регулирования (налоговые льготы, кредиты под низкие проценты и т. д.) (JTEC, 1996), а прямое финансирование связано, в первую очередь, с реализацией долгосрочных поисковых исследовательских проектов («long-range» or «blue sky» projects).

Активное финансирование бизнесом исследований в области фотоники во многом стимулируется созданной в 1980 г. Ассоциацией промышленного и технологического развития оптоэлектроники (Optoelectronics Industry and Technology Development Association — OITDA). OITDA выполняет представительскую и координирующую роль, а также организует маркетинговые исследования, утверждает отраслевые стандарты, организует крупные технологические проекты на основе ГЧП. С 2011 г. OITDA координирует разработку Технологической дорожной карты в области оптоэлектроники до 2030-х гг. (“Optoelectronics Technology Roadmap towards the 2030s.”) [2.18].

В 2007 г. Министерство образования, культуры, спорта, науки и технологий (MEXT) опубликовало «Промежуточный доклад по продвижению науки и технологий в области фотоники» (“Interim Report for the Promotion of Photon Science and Technology”), в котором констатировалось, что исследования в области фотоники не рассматриваются как самостоятельная область, и потому отсутствует стратегическое позиционирование фотоники [2.19]. В докладе были предложены два типа программ для поддержки фотоники: образование сетевых исследовательских баз, в которых участвуют промышленность и стратегические партнеры, концентрируя деятельность вокруг нескольких исследовательских институтов, в которых будут проводиться исследования и подготовка/развитие персонала, поддержка инновационных исследовательских проектов.

По оценкам экспертов, нарастающая конкуренция со стороны Китая и Южной Кореи заставляет правительство Японии переориентировать поддержку на новые рынки — фотонику в медицине и машинное зрение [2.20], однако существенного наращивания государственного финансирования исследований по фотонике в Японии до 2020 г. не ожидается.

2.4. Южная Корея

В Южной Корее фотоника в 2000 г. была выбрана в качестве одной из четырех стратегических отраслей для преодоления последствий южноазиатского кризиса 1998 г. (OECD, 2012). Основным инструментом ее государственной поддержки стало формирование фотонного кластера в Кванжу (Gwangju). На начальном этапе инвестиции в кластер поступали из трех источников: 60% — центральное правительство, 15% — местное правительство, 25% — частные инвестиции. При этом 80% инвестиций пошло на закупку оборудования и программного обеспечения и 20% — на НИОКР [2.21].

Тогда же в Кванжу была образована Корейская ассоциация развития фотонной отрасли (The Korea Association for Photonics Industry Development — KAPID), и создан Корейский институт фотонных технологий (Korea Photonics Technology Institute — KOPTI).

За 10 лет объемы продаж компаний фотонного кластера в Кванжу выросли более чем в 20 раз, количество фирм — почти на порядок, количество занятых — более чем в 4 раза (Таблица 2.1).

Таблица 2.1 — Динамика развития фотонного кластера в Кванжу

Показатель	2000	2003	2008	2010
продажи (млрд. KRW)	113,6	323,4	1307,9	2540
количество занятых	1896	2834	6018	8004
количество фирм	47	190	327	360

Источник: [2.21]

2.5. Китай

В Китае фотоника особенно быстро развивалась в течение последних 10–15 лет, в основном в таких областях, как солнечная энергетика, освещение (сегмент LED), оптоволоконная связь, а также лазерная техника [2.22]. При этом единой государственной стратегии по развитию фотоники в Китае нет, однако в ряде программных документов отмечают-

ся планы по приоритетному развитию отдельных тематик. Так, в двенадцатом национальном пятилетнем плане развития науки и технологий (The National 12th Five-Year Plan on Science & Technology Development) в одну из приоритетных областей («Энергоэффективность») входят проекты, связанные с LED-освещением (LED lighting projects) [2.22].

В этом же плане сделан акцент на следующих областях, связанных с фотоникой:

- оптическая коммуникационная сеть и системное оборудование;
- гибкие дисплеи;
- новые оптоэлектронные устройства, сенсоры и приложения, источники терагерцевого излучения.

В области фотоники в Китае работает ряд институтов Китайской Академии наук, а также 27 Ключевых государственных лабораторий (State Key Laboratory), что составляет более 10% от общего их количества. В Китае исторически сложилось, что институты академии наук в большей степени ориентированы на прикладные исследования, а университеты — на фундаментальные. [2.22].

В географическом плане в Китае есть несколько центров развития фотоники: Ухань (Wuhan), Шанхай, Пекин и др. Вокруг Уханя сформировался крупнейший в Китае оптоэлектронный кластер — Оптическая долина Китая (Wuhan Optical Valley of China), базу которой составляют 18 университетов и институтов, 56 государственных научных организаций и более 150 тыс. экспертов в данной области [2.22].

В 2000-х гг. Оптическая долина была признана Национальной промышленной базой оптоэлектроники (National Optoelectronics Industrial Base), что позволило за счет государства расширять и развивать ее территорию [2.23]. В 2009 г. она получила более высокий статус — модельной зоны отечественных инноваций (self-innovation model zone), что стимулировало ее дальнейшее развитие.

Для привлечения ведущих специалистов в Оптической долине в 2009 г. началась реализация программы привлечения высококвалифицированных кадров (“3551 optics valley talent program”). Ряд ведущих на мировом уровне исследователей в области фотоники были приглашены в Оптическую доли-

ну в рамках государственной «Программы привлечения 1000 высококвалифицированных специалистов из-за рубежа».

Таким образом, в Японии фотоника развивается силами промышленности, в Южной Корее и Китае ее развитию уделяется больше внимания на государственном уровне, хотя и в этих странах фотоника не относится к национальным технологическим приоритетам. Обе страны фактически выбрали кластерный подход к поддержке фотоники, стимулируя связи и конкуренцию участников рынка.

Зарубежный опыт реализации государственной политики в области фотоники показывает, что она признана важной обеспечивающей технологией, необходимой для развития стратегических отраслей и новых направлений. В то же время существенная разнородность практических применений фотоники препятствует формированию ее статуса в качестве единого национального технологического приоритета. Разнообразный состав исследовательских групп и компаний, работающих в области фотоники, определяет важность их самоорганизации в той или иной форме (отраслевой ассоциации, технологической платформы, кластера и т. п.) для повышения конкурентоспособности производственных цепочек и лоббирования государственной поддержки.

Усиление конкуренции на мировых рынках фотоники со стороны Китая и Южной Кореи заставляет США, страны ЕС и Японию менять приоритеты и инструменты государственной поддержки. В США и ЕС развиваются новые инструменты ГЧП, позволяющие аккумулировать большие объемы финансовых ресурсов и усиливать координацию работ под контролем отраслевых сообществ. Государственная политика в Китае и Южной Корее, в свою очередь, ориентирована на масштабную инфраструктурную поддержку через развитие специализированных кластеров.

3. Российский опыт поддержки исследований и разработок в области фотоники

3.1. Рынки и оценка потенциала

Высокий потенциал фотоники для переструктурирования традиционных рынков (ИКТ и др.) и формирования новых (в области биофтоники и др.) вызвали пристальный интерес к данному направлению в России. В нашей стране правительство стало уделять особое внимание фотонике в начале 2010-х гг., в результате чего был разработан и в 2013 г. утвержден план мероприятий («дорожная карта») «Развитие оптоэлектронных технологий (фотоники)»[1], в рамках которого планировалось включить ее в состав приоритетов развития науки, технологий и техники в стране. В июле 2014 г. фотоника стала ключевой темой заседания президиума Совета при Президенте Российской Федерации по модернизации экономики и инновационному развитию России. В январе 2015 г. была утверждена обновленная Стратегическая программа технологической платформы «Фотоника» на 2015–2025 гг. [3.1], а в июне 2015 Министерство образования и науки РФ включило фотонику в число трех приоритетных исследовательских фронтов для Национальной технологической инициативы. Для повышения уровня координации в данной области в 2016 г. была утверждена

[1] Утвержден распоряжением Правительства Российской Федерации от 24 июля 2013 г. №1305-р.

Межведомственная программа исследований и разработок в области фотоники на 2017–2020 гг., согласованная Министерством образования и науки РФ, Министерством промышленности и торговли РФ и ГК «Роскосмос».

В России отсутствует официальная статистика, отражающая ситуацию в области фотоники. Сбором и публикацией данных занимается Лазерная ассоциация (ЛА) и созданная на ее основе технологическая платформа «Инновационные лазерные, оптические и оптоэлектронные технологии — фотоника» (ТП «Фотоника»). Но из-за неотлаженности процесса сбора информации государственными ведомствами аналитические возможности ТП «Фотоника» ограничены, что приводит к фрагментарности и сильным колебаниям количественных оценок. К тому же собираемая статистика отражает в первую очередь ситуацию с производством продукции фотоники, а не ее потреблением.

Существуют экспертные оценки по отдельным гражданским рынкам (оптоволоконные кабели, светодиодное освещение, лазерное оборудование для обработки материалов), но это — лишь незначительная часть рынков фотоники. Кроме того, в большинстве случаев доступна только обобщенная информация, не позволяющая проводить анализ динамики и структуры рынков.

Всего, по оценкам ТП «Фотоника», в России в данной области работает около 850 организаций, основная их часть — это малые предприятия (320 компаний) и некоммерческие организации (вузов — 150, медучреждений — 120, отраслевых НИИ, КБ и НПО — около 100, академических институтов — 80). И только примерно 60 организаций можно отнести к производственным объединениям и крупным предприятиям [3.1]. Общая численность занятых на предприятиях, работающих в области фотоники, составляет около 56 тыс. человек, в том числе 34 тыс. человек — специалисты с профильным высшим образованием.

В 2012–2013 гг. ТП «Фотоника» оценивала российский рынок гражданской продукции фотоники в 0,2% от мирового [3.2] (менее 1 млрд долл.), а годовой объем производства продукции с использованием технологий фотоники — в 8–10 млрд руб. [3.3]. По результатам опроса 116 российских компаний, проведенного ТП «Фотоника» в 2015 г., оценка

суммарного объема продаж на внутреннем и внешнем рынках в 2014 г. составила уже около 60 млрд руб. [3.4]. Основной объем продаж отечественной продукции пришелся на материалы и элементную базу фотоники (19%), продукцию фотоники для ИТ (17%) и лазерное технологическое оборудование (15%) (Табл. 3.1).

На предприятия с численностью занятых более 100 человек пришлось около 80% совокупных продаж продукции фотоники, на малые предприятия — около 15%, и около 5% — на НИИ, КБ и университеты. В то же время для малых компаний характерны большая доля экспорта в объеме продаж (из них 70% экспортируют продукцию, средняя доля экспорта — 21%) и инвестиций в НИОКР (в среднем — 26% от годовой выручки) в сравнении с крупными компаниями, НИИ и университетами. В среднем только треть из крупных предприятий, НИИ и университетов осуществляют экспорт продукции, доля продаж за рубеж составляет около 3% для крупных предприятий и 1% для университетов и НИИ; доля расходов на НИОКР в выручке у крупных компаний — 17%, у НИИ и университетов — 24% [3.4]

Характерная особенность России еще и в том, что, несмотря на наличие отдельных конкурентоспособных предприятий, на внутреннем рынке нередко доминируют иностранные компании. Так, например, по оценкам экспертов, доля отечественных производителей (в денежном выражении) на рынке лазерного оборудования в России в 2013 г. составляла только около 26% [3.5]. В области производства оптоволоконного кабеля в 2014 г. более 70% рынка занимали российские компании [3.6], однако оптическое волокно для кабелей до последнего времени полностью импортировалось [3.7]. Сложная ситуация и с производством оборудования для волоконно-оптических систем — отечественные производители обеспечивают только около 7% потребностей в системах DWDM [3.3]

Поскольку статистика спроса на продукцию фотоники в России ограничена, в качестве источника информации в данной работе использовались результаты интервью, проведенных в 10 российских частных компаниях в 2015 г., освещающих один из срезов спроса на рынке фотоники. Для большинства опрошенных компаний спрос формируют круп-

Таблица 3.1 — Структура продаж отечественной продукции в основных секторах фотоники

Сектор фотоники	Объемы продаж, млрд руб.	Доля в общем объеме продаж, %
Оптические материалы, элементы, узлы	11,2	19
Оптоэлектроника, оптоинформатика, оптическая связь	10	17
Лазерное технологическое оборудование	8,9	15
Источники лазерного излучения	5,3	9
Аппаратура для технических измерений и диагностики, оптические сенсоры	5,2	9
Фотоника для медицины и наук о жизни	4,8	8
Волоконно-оптическая техника	4,2	7%
Лазерное навигационное оборудование	2,5	4
Светодиоды	2	3
Аппаратура контроля лазерного луча	1,8	3
Оборудование и продукция голографии	1,6	3
Дисплеи, световые шоу (аппратура и программы)	0,7	1
Продукция фотовольтаики	0,3	1
Оборудование для сельского хозяйства и ветеринарии	0,1	0
Другое	0,8	1
ВСЕГО	59,4	100

Источник: [3.4]

ные госкомпании, работающие в оборонно-промышленном комплексе или в аэрокосмической промышленности. Также относительно крупными потребителями продукции фотоники являются компании, работающие в области спецсвязи, и крупные государственные медицинские центры. Частный сектор предъявляет спрос в основном на НИОКР.

В числе основных проблем компании указали ограниченность спроса на продукцию фотоники в России и одновременно на дефицит доступных финансовых ресурсов для разработки новой высокотехнологичной продукции. Существенной характеристикой спроса стало также то, что крупные госкомпании, на которые в основном рассчитывает частный бизнес, ориентированы в первую очередь на покупку комплексных зарубежных технологических решений (см., в частности, интервью журналу «Эксперт» гендиректора компании «Т8» [3.8]).

Таким образом, российский рынок фотоники представляет собой крайне ограниченный сегмент мирового, со структурой спроса, смещенной в сторону сегмента безопасности и обороны.

Отдельного внимания заслуживает тема конкурентоспособности российских компаний, работающих в области фотоники. Несмотря на то, что на внутреннем рынке во многих областях доминируют зарубежные производители, многие малые компании, работающие в области фотоники, демонстрируют высокую экспортную активность, что свидетельствует о наличии в России конкурентоспособных разработок. При этом под вопросом остается степень влияния мер государственной политики на повышение конкурентоспособности российских компаний, работающих в области фотоники.

Чтобы определить, есть ли связь между мерами государственной политики и результативностью работы компаний, а также получить более полное представление о характере и результатах работы компаний, была составлена база данных, включающая информацию о разных видах государственных источников финансирования исследований в области фотоники, а также российских компаниях, работающих в этой области.

3.2. Государственная поддержка исследований и разработок

Поддержка гражданских исследований и разработок в области фотоники в России осуществляется на основе ряда общих инструментов. Так, Министерство образования и науки РФ реализует Федеральную целевую программу (ФЦП) «Исследования и разработки по приоритетным направлениям

развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», а также Программу по созданию высокотехнологичных производств в рамках Постановления Правительства РФ от 9 апреля 2010 г. №218[1] (далее — Постановление №218). Министерство промышленности и торговли РФ поддерживает различные подпрограммы в рамках Государственной программы «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности» и проекты Фонда развития промышленности (ФРП).

Институты развития (Фонд содействия развитию малых форм предприятий научно-технической сферы (Фонд Бортника), Фонд «Сколково», «Роснано» и Фонд перспективных исследований) также осуществляют поддержку проектов НИОКР. Систематизированных данных о поддержке фотоники в рамках перечисленных инструментов нет. По некоторым оценкам [2.5] ее объемы таковы:

- Фонд Бортника ежегодно поддерживает 30–40 крупных проектов по фотонике (до 15 млн руб.) и 50–60 небольших — по 400 тыс. руб. Всего за последние пять лет на фотонику в Фонде только на крупные проекты было выделено 5 млрд руб.;
- «Роснано» — 15 проектов (на сентябрь 2015 г.);
- Фонд «Сколково» — пять проектов, связанных с фотоникой, кроме того, 40 малых предприятий лазерно-оптической специализации имеют льготы как резиденты «Сколково»;
- Минпромторг РФ по разным программам в 2015 г. поддержал 16 проектов по фотонике и ее применениям.

В Минобрнауки РФ — учет проектов по фотонике не ведется. По Фонду развития промышленности (ФРП) оценки отсутствуют, как и по Фонду перспективных исследований (ФПИ), однако, по информации с сайта, ФПИ содействовал созданию нескольких лабораторий, работающих в области фотоники.

[1] Постановление Правительства России от 9 апреля 2010 г. №218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства».

Для уточнения данных о динамике и масштабах поддержки фотоники в России, в частности со стороны Минобрнауки РФ и ФРП, авторами была сформирована база данных проектов, которые, по мнению авторов, связаны с фотоникой. Источником данных были доступные на официальных сайтах сведения о поддержанных проектах в таких программах, как ФЦП «Исследования и разработки» на 2007–2013 гг. и на 2014–2020 гг.; поддержки создания высокотехнологичных производств в рамках Постановления №218 и программы ФРП по займам, проектному финансированию и субсидиям.

Был проведен анализ названий проектов путем выделения в них ключевых слов, имеющих отношение к фотонике: «оптика», «лазер», «фото», «свет», «фотон», «квант», «оптоэлектроника» и др., с последующей смысловой проверкой названий проектов. Отметим, что данный подход имеет ряд серьезных недостатков: значительное количество отобранных проектов являются междисциплинарными, далеко не всегда по названию проекта можно точно понять его содержание, решение об отнесении/исключении спорных проектов к «проектам, связанным с фотоникой» носило субъективный характер на основе консультаций с экспертами — специалистами в области фотоники. В то же время, с учетом отсутствия других источников информации, данные оценки можно использовать в качестве первого приближения для анализа масштабов поддержки фотоники со стороны Минобрнауки РФ и ФРП.

Проведенный анализ показал, что за 2009–2015 гг. в рамках ФЦП «Исследования и разработки» было поддержано более 440 проектов, относящихся к фотонике, общий объем финансирования — около 10 млрд руб.; по 78% проектов основными исполнителями были университеты, академические или государственные исследовательские институты, и только по 22% — компании, в том числе — государственные.

В рамках ФЦП «Исследования и разработки» в 2015 г. доля бюджетного финансирования контрактов, относящихся к фотонике, в общем объеме бюджетного финансирования достигла максимума (13%) (в 2009–2015 гг.— 9–12%). В рамках программы по созданию высокотехнологичных производств из федерального бюджета было профинансировано 22 про-

екта, имеющих отношение к фотонике, на общую сумму почти 2,7 млрд руб., из них частные компании получили около 1,5 млрд. руб. Объем финансирования проектов по фотонике относился к общему объему финансирования исследовательских проектов в рамках ФЦП «Исследования и разработки», но без учета мероприятий, связанных с научно-технологическим прогнозированием, информационной поддержкой, организацией конференций, проектами по юридическим и управленческим тематикам. Фонд развития промышленности (на начало 2016 г.) поддержал восемь проектов в этой сфере.

Для выявления компаний, имеющих отношение к исследованиям, разработке технологий или производству продукции фотоники, был проанализирован состав членов следующих организаций и мероприятий:

- Лазерной ассоциации, тематических технологических платформ (ТП «Фотоника», ТП «Светодиоды»);
- участников ведущих российских и зарубежных тематических выставок («Фотоника. Мир лазеров и оптики», Laser world of photonics; Photonics West);
- исполнителей исследовательских проектов, связанных с фотоникой, выполняемых в рамках различных государственных программ (ФЦП «Исследования и разработки» на 2007–2013 гг.» и на 2014–2020 гг.; Постановление №218);
- компаний, поддержанных различными институтами развития и фондами («Сколково», «Роснано», Фонд развития промышленности);
- победителей различных технологических рейтингов (рейтинги «ТехУспех», Конкурс русских инноваций, премия «Индустрия»);
- прочие открытые источники.

Всего было выявлено около 460 компаний, имеющих отношение к фотонике. Более детальный анализ сайтов компаний и других открытых источников позволил уточнить, что только для половины из них фотоника является основным или одним из основных направлений деятельности.

К ключевым средним и крупным компаниям были отнесены:

- *государственные*: предприятия АО «Швабе», ОАО НПК «СПП», ОАО ЦНИИ «Циклон» и др.;

- *частные:* ООО НТО «ИРЭ-Полюс», ОАО «ЛОМО», ОАО «ПНППК», АО «Монокристалл», ООО «Инкаб», АО, «Катод», ОАО «Супертел», ООО «Т8» и др.

На следующем этапе на основе сведений о 230 компаниях из базы данных «СПАРК» (информация по выручке была доступна только по 153 компаниям) были получены следующие результаты:

- суммарная выручка 153 компаний (за последний доступный год с 2010-го по 2014-й) составляла около 69,5 млрд руб., что, несмотря на разницу в методологии, хорошо коррелирует с результатами опроса, проведенного ТП «Фотоника»;
- совокупная выручка компаний, работающих в области фотоники, в 2010–2014 гг. росла темпами, сопоставимыми с темпами роста российской экономики в целом — совокупный прирост выручки за 2010–2014 гг. 68 компаний, доля которых в совокупной выручке 153 компаний составляет 88% (по которым доступна информация по выручке на 2010 г. и 2014 г.) составил около 71%, в то время как ВВП России в текущих ценах за 2010–2014 гг. вырос на 68%;
- более половины совокупной выручки (51%) приходится на госкомпании, 41% — на частные, и остальное — на долю иностранных или совместных компаний (в основном за счет ООО НТО «ИРЭ-Полюс»). При этом 67% совокупной выручки приходится на предприятия, входящие в Реестр оборонно-промышленного комплекса. Таким образом, основной спрос на продукцию фотоники, по-видимому, формируется за счет госзаказа;
- для 129 компаний из 230 основным видом деятельности являются «Научные исследования и разработки в области естественных и технических наук»;
- пиковыми по количеству новых регистраций компаний стали 1992 г. и 2011–2012 гг. (Рисунок 3.1). Можно предположить, что активное формирование новых компаний, работающих в области фотоники, в конце 2000-х–начале 2010-х гг. связано с работой институтов развития (Фонд «Сколково», «Роснано», РФТР и др.).

Для более детального анализа влияния отдельных мер государственной поддержки были рассмотрены две группы

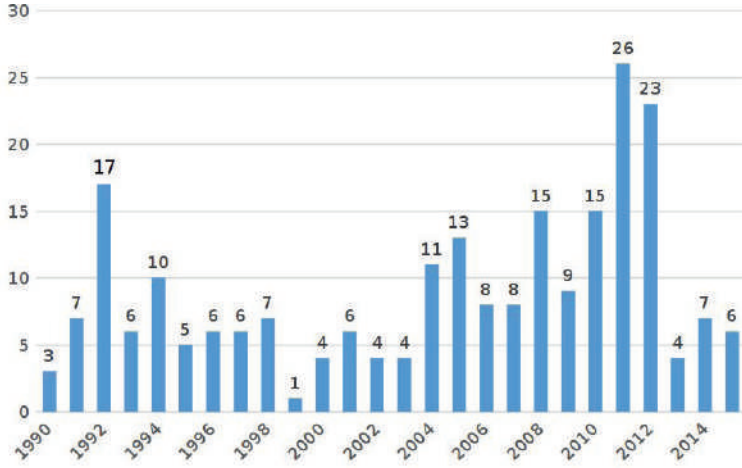


Рисунок 3.1 — Количество компаний, деятельность которых связана с фотоникой, по году регистрации

Источник: рассчитано по БД «СПАРК»

компаний: имеющие самую большую выручку и демонстрирующие самые высокие темпы роста.

Были выделены 15 крупнейших компаний (чья выручка в 2014 г. превосходила 1 млрд руб., и у которых в последние годы были положительные темпы ее прироста) и 24 наиболее быстро растущие (выручка за 2010–2014 гг. выросла более чем в 2 раза).

При анализе этих групп компаний мы ограничивались следующими мерами государственной поддержки: ФЦП «Исследования и разработки» на 2007–2013 гг. и на 2014–2020 гг., Постановление №218, и компаниями, ставшими резидентами «Сколково», а также сотрудничавшими с «Роснано» или ФРП. Подобное ограничение анализа обусловлено, в первую очередь, проблемами с доступностью информации по другим мерам поддержки, которыми они пользовались, начиная с 2009 г.

Основные характеристики «Топ-15» крупнейших компаний:

- совокупная выручка составляет 50,1 млрд руб. (72% от общей выручки 153 компаний);
- из них восемь компаний (36% выручки) — частные, шесть — государственные (54%), одна — иностранная (10% выручки);
- из восьми крупнейших частных компаний две ориентированы преимущественно на оборонный заказ; одна занимаетсяя производством материалов для фотоники; по две компании производят оптоволоконный кабель и светодиодные светильники и одна — телекоммуникационное оборудование; мерами господдержки пользовались 10 из 15 компаний. Наиболее популярная — связанные гранты по Постановлению №218 (пять компаний), еще три получили кредиты в ФРП, в две компании инвестировало «Роснано» и три — в разные годы принимали участие в ФЦП «Исследования и разработки».

Основные характеристики «Топ-24» компаний, показавших наибольший прирост выручки в 2010–2014 гг.:

- среди них — 16 частных компаний, шесть государственных и две — с иностранным участием;
- четыре предприятия можно отнести к числу крупных (из них три входят в Реестр оборонно-промышленного комплекса), шесть — средние, 14 — микро- и малые компании. Для расчетов использовались следующие максимальные величины выручки для разных категорий компаний: для средних — 2 млрд руб., для малых — 800 млн руб., для микро- — 120 млн руб.;15 компаний не пользовались рассматриваемыми мерами господдержки, четыре были резидентами «Сколково», три взаимодействовали с «Роснано», две получили кредиты от ФРП, четыре в разные годы воспользовались финансированием по ФЦП «Исследований и разработки» и три предприятия участвовали в проектах создания высокотехнологичных производств (Постановление №218).

Таким образом, для обеих групп компаний наиболее широко распространенным стало участие в проектах ФЦП и сотрудничество с вузами в области НИОКР для создания высо-

котехнологичных производств (Постановление №218). При этом эксперты указывают на разные пути поддержки фотоники, в зависимости от специфики направления и стадии работ. Некоторые предложения по корректировке мер государственной поддержки исследований и разработок в области фотоники, сформулированные представителями научного сообщества, приведены в Приложении.

Проведенный анализ показал, что информация о рынках фотоники, где присутствует Россия, крайне ограниченная и неполная. Данные о мерах государственной поддержки также фрагментарны и позволяют примерно оценить уровень вложений, но не результатов, которые связаны непосредственно с государственным регулированием.

Систематизация количественных данных из разных источников и опрос компаний позволили сделать вывод, что в области фотоники в России работают крупные государственные и частные компании, однако основной спрос на отечественную продукцию формируется в государственном секторе экономики. На большинстве гражданских рынков, открытых для конкуренции, доминируют зарубежные компании.

Несмотря на наличие отдельных быстрорастущих компаний как в государственном, так и в частном секторах экономики, в целом выручка компаний, работающих в области фотоники, в 2010–2014 гг. росла темпами, характерными для экономики России в целом.

4. Оптические материалы, структуры и источники

4.1. Полупроводниковые системы

4.1.1. Полупроводниковые эпитаксиальные наногетероструктуры для фотонных применений

В КОНЦЕ 60-х годов прошлого века в СССР и США практически одновременно были открыты полупроводниковые гетероструктуры [4.1]. Началась эра полупроводниковой фотоники. Новые материалы кардинально улучшили параметры полупроводниковых приборов, прежде всего излучателей высокой яркости, лазеров, светодиодов и фотоприемников, включая солнечные элементы. Развитие полупроводниковой фотоники продолжается и сейчас, вызывая к жизни принципиально новые устройства и удовлетворяя все более возрастающим потребности человечества. Появляется все больше новых материалов, открывающих доступ в неосвоенные до этого области спектра. За счет использования и развития современных эпитаксиальных технологий возникают новые возможности манипулирования веществом и светом. Действительно, молекулярно-пучковая или молекулярно-лучевая эпитаксия [4.2] (МПЭ или МЛЭ,— molecular beam epitaxy — MBE) и металлорганическая газофазная эпитаксия (МОГФЭ, metal-organic vapor phase epitaxy — MOVPE) позволяют контролировать процесс синтеза гетероструктур на атомарном уровне, с точностью до долей нанометра, и создавать искусственные кристаллы — наногетероструктуры [4.3], открывая тем самым новые горизонты в нанофотонике. Точно так же как кремний по-прежнему служит глобальным материалом электроники, благодаря неисчерпаемости запа-

сов, экологичности, стабильности и прочности кристаллической решетки, современная полупроводниковая фотоника базируется на простейших стехиометрических бинарных полупроводниках. К ним относятся приборы на основе элементов III и V групп периодической таблицы, например, AlN, GaAs, InSb или обобщенно A3B5 и II и VI — ZnO, ZnSe, CdTe (A2B6). Они обладают прямозонной электронной структурой, принципиально важной для эффективного излучения и поглощения света. Данные соединения потенциально перекрывают спектральный диапазон от среднего инфракрасного (ИК) (12 мкм — InAsSb, полуметалл — HgTe) до глубокого ультрафиолетового (УФ-С) (0.21 мкм — AlN). Основными практическими характеристиками таких полупроводниковых излучателей, переключателей и фотоприемников является компактность, эффективность, надежность, экологичность, быстродействие и относительная простота технологических процессов эпитаксиального роста.

Области применения приборов полупроводниковой фотоники на основе соединений A3B5 и A2B6 охватывают информационно-телекоммуникационные системы, атмосферную и космическую связь, радиофотонику, метрологические и навигационные системы, медицинскую диагностику и лечение, экологический и промышленный мониторинг природных и техногенных газов, возобновляемую эффективную энергетику, системы очистки и обеззараживания воды и воздуха, энергосберегающие системы общего освещения и интеллектуального света, системы обнаружения биологических угроз, синтез лекарственных препаратов, витаминов, белков, и, наконец, системы безопасности, противоракетной обороны, тепловидения, квантовой криптографии.

Область науки, связанная с разработкой полупроводниковых эпитаксиальных наногетероструктур и технологий для фотоники, чрезвычайно широка и не может быть охвачена в кратком изложении. В частности, за рамками этого раздела аналитического обзора лежат направления, связанные с разработкой классических полупроводниковых гетероструктур диодных лазеров, светодиодов, оптических модуляторов и переключателей, диодных фотоприемников на основе систем материалов AlGaInAs, InGaAsP, предназначенных для работы в красном (0.62–0.78 мкм), ближнем

ИК (0.75–1.3 мкм) и телекоммуникационном (1.3–1.55 мкм) диапазонах. Это связано с тем, что технологии МПЭ и МОГФЭ данных полупроводниковых гетероструктур в России освоены на сопоставимом с мировым уровне (ФТИ им. А. Ф. Иоффе, ОАО «НИИ «Полюс» им. М. Ф. Стельмаха», ООО «Коннектор Оптикс», ООО «Иннолюм», ИФП СО РАН), хотя и в меньших масштабах. Во-вторых, проблемы эпитаксиальных технологий и качества для данных наногетероструктур в существенной степени решены, и фактором, определяющим уровень компетенции в данной области, является разработка конструкций соответствующих фотонных приборов и модулей, а также их постростовой технологии.

В данном разделе дается обзор новых перспективных полупроводниковых материалов и типов эпитаксиальных наногетероструктур, предназначенных для перекрытия проблемных на данный момент (в силу физических и технологических причин), но практически важных спектральных диапазонов: среднего и глубокого УФ, видимого (зеленого и желтого), среднего ИК и терагерцового. Очевидно, в силу ограниченности ресурсов, разработка всех новых материалов и типов полупроводниковых гетероструктур в России в данный момент не представляется возможной. При рассмотрении каждого из перечисленных выше направлений делается упор на те из них, которые могут, во-первых, применяться в ключевых гражданских областях — в медицине, экологии, безопасности, возобновляемой энергетике и энергосбережении, защищенной связи, а во-вторых — имеют в России достаточный научно-технологический задел. Кроме того, большинство этих материалов и технологий являются объектами обязательного импортозамещения.

Фотоника среднего и глубокого УФ-диапазона. Излучатели и фотоприемники.

Эпитаксиальные гетероструктуры широкозонных полупроводниковых соединений нитридов металлов третьей группы (Al, Ga) N являются наиболее перспективными и интенсивно разрабатываемыми материалами для реализации компактных эффективных приборов полупроводниковой оптоэлектроники среднего и глубокого УФ-диапазона (210–350 нм).

В первую очередь речь идет о лазерах и светодиодах, способных заменить в ряде применений громоздкие газовые и эксимерные лазеры, а также экологически небезопасные ртутные лампы. Другим важным классом являются фотоприемники (ФП) видимо-слепого (менее 400 нм) и солнечно-слепого (менее 290 нм) диапазонов на основе обычных *p-i-n* диодов и фотокатодов с отрицательным электронным сродством. Варьируя состав твердого раствора или используя квантоворазмерные гетероструктуры на основе AlGaN, можно конструировать излучатели и ФП, настроенные на любую конкретную длину волны во всем перекрываемом ими спектральном диапазоне. И, наконец, соединения AlGaN обладают беспрецедентно высокой радиационной, химической и тепловой стойкостью, что делает их привлекательным для приложений в космической электронике, атомной и оборонной промышленности, а также обеспечивает срок службы на порядок больший, чем, например, у ртутных ламп.

Научные и технологические барьеры развития. На пути коммерческого выпуска приборов УФ-фотоники на основе AlGaN гетероструктур с высоким содержанием Al (более 40 мол%) стоит целый ряд нерешенных научных и технологических проблем. К ним относятся: низкая эффективность излучательной рекомбинации (на уровне нескольких%), вызванная прежде всего отсутствием коммерчески доступных подложек, близких к AlGaN по постоянной кристаллической решетки и коэффициенту термического расширения, относительно слабая локализации носителей заряда, не дающая пока заметно увеличить квантовый выход люминесценции, специфическая электронная структура, ответственная за смену поляризации выходного излучения от обычной TE к TM-поляризации в области приблизительно 250 нм, что существенно затрудняет вывод излучения в направлении, нормальном к поверхности структуры, и, наконец, сложность получения необходимого уровня *p*-легирования этих широкозонных соединений.

Кроме того, традиционно используемая технология для коммерческого выпуска полупроводниковых эпитаксиальных гетероструктур — A3-нитридов для фотонных приборов видимого и ближнего УФ-диапазона (МОГФЭ) — испытывает серьезные технические трудности при получении

соединений AlGaN с большим содержанием Al. Решение проблемы коммерческого выпуска таких соединений требует существенной модификации оборудования МОГФЭ и новых технологических подходов (из-за «паразитных» реакций в газовой фазе). С другой стороны, открывается возможность для разработок технологии МПЭ с плазменной активацией азота или с использованием разложения аммиака, которая становится конкурентоспособной в плане промышленного производства.

Востребованность направления и рыночные перспективы. Согласно обзору одной из ведущих фирм в области научного и маркетингового прогнозирования высоких технологий Yole Développement (Франция) [4.4] и данным обзорных статей ведущих специалистов Японии [4.5] и США [4.6], наиболее коммерчески востребованным станет применение УФ СД с длиной волны менее 280 нм для дезинфекции воды, воздуха, помещений и продуктов питания. Кроме того, УФ-излучатели и ФП необходимы для развития фоточувствительных технологий отверждения полимеров, печати и нанесения лакокрасочных покрытий, синтеза новых материалов, оптической спектроскопии, а также многих областей биологии и медицины. Широкое применение УФ-фотоника найдет в оборонной технике и системах безопасности. Эти приложения более подробно раскрыты в Таблице 4.1.

Обзор Yole Développement [4.4] показывает, что сегодняшний мировой объем полупроводникового сегмента рынка УФ-фотоники составляет $150M (в 2009 г. он не превышал $25M). К 2017 г. возможно достижение $300M при росте удельной доли в общем рынке УФ-оптоэлектроники до 35%. Эта оценка отражает лишь гражданские приложения и не учитывает целый ряд оборонных программ (см. ниже).

Российский рынок не исследовался, но при условии государственной поддержки по одному лишь направлению замены Hg-ламп в системах водо- и воздухоочистки, а также систем дезинфекции в медицинских учреждениях можно было бы существенно перекрыть расходы на разработку и внедрение.

Таблица 4.1 — Основные приложения полупроводниковой УФ-фотоники

Решаемые задачи	Области применения	Конкретные приложения
Экология	Развитие фотокаталитических методов очистки от бактерий	Компактные полупроводниковые многоэлементные УФ-лампы для оптической дезинфекции воды, воздуха, помещений и инструментов
Новые фототехнологии	Технологии полимеров	Медицина (стоматология и хирургия),
	Печать	УФ-лазерные принтеры высокой четкости
	Нанесение лакокрасочных покрытий	Покраска крупных объектов при низких температурах
	Электроника и компьютерная техника	УФ-литография высокого разрешения Разработка оптических средств хранения информации сверхбольшой емкости
Люминесцентный анализ веществ, их синтез или модификация под воздействием УФ-излучения	Медицина	Диагностика и фототерапия различных заболеваний
	Биология	Изучение и воздействие на биологические объекты (в т.ч. на уровне ДНК)
	Фармакология	Синтез биологически активных веществ, витаминов
	Физика и материаловедение	Анализ и синтез веществ
	Торговля и банковское дело	Экспресс-определение подлинности документов и платежных средств
Военные приложения и безопасность	Химическая и биологическая защита	Экспресс-анализ боевых отравляющих веществ
	Оружие и боеприпасы	Разработка «солнечно-слепых» систем обнаружения-наведения ракет и т.д.
	Связь	Оперативная помехозащищенная секретная оптическая связь

Лазеры видимого спектрального диапазона (0.52–0.59 мкм)

Востребованность направления и рыночные перспективы. Интерес к компактным полупроводниковым лазерам (ПЛ) зеленого (0.52–0.56 мкм) и желтого (0.56–0.59 мкм) диапазона вызван возможностью создания дешевых внутриобъектовых волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) на пластиковых волокнах с акриловой сердцевиной PMMA, систем проекционного лазерного телевидения высокой четкости, систем лазерной навигации и дальнометрии, а также подводных систем оптической связи благодаря окну прозрачности морской воды вблизи 0.5 мкм. Всплеск коммерческого интереса к разработкам миниатюрных высокоэффективных зеленых ПЛ связан с активно развиваемой в последние годы идеей создания интегрированных со смартфонами, цифровыми камерами и ноутбуками лазерных пико-проекторов. Согласно Yole Développement [4.4], мировой рынок таких устройств вырастет в 2016 г. до $500M. Создание желтого ПЛ важно для расширения цветового пространства (CMYK) принтеров и лазерного телевидения, а также для ряда медицинских приложений, в частности, для лечения сердечно-сосудистых заболеваний, заболеваний крови и офтальмологии. Лазерное излучение в желтой области спектра успешно применяется для фотокоагуляции, поскольку коэффициент поглощения желтого света различными формами гемоглобина существенно выше, чем зеленого, при более низком коэффициенте поглощения меланином [4.7].

Научные и технологические барьеры развития направления; профиль разработок в мире. Особенности зонной структуры соединений на основе AlGaInP делают зеленый и желтый диапазоны для таких ПЛ недостижимыми. Попытки продвинуться в создании ПЛ желто-зеленого спектрального диапазона продолжались вплоть до начала 90-х годов прошлого века [4.8, 4.9]. После изобретения способа получения ZnSe p-типа путем легирования его плазменно-активированным азотом в 1991 г., основную роль в разработке технологии ПЛ и СД сине-зеленой области спектра играли полупроводниковые гетероструктуры A2B6 [4.10]. Однако, проблема медленной деградации таких гетероструктур, вызванная нестабильностью азотного акцеп-

тора [4.11] и ограничивающая время непрерывной работы до 400 ч [4.12] не находила решения до 1998 г., когда началось бурное развитие полупроводниковых ЛД сине-фиолетового диапазона на основе системы (Al,Ga,In)N [4.13], инициированное более ранними работами I. Akasaki, H. Amano и S. Nakamura (Нобелевская премия по физике 2014 г). Все же до 2010 г. зеленый спектральный диапазон был технологически недостижим для этой системы материалов по причине большой плотности дефектов в активной области InGaN — квантовой яме (КЯ). В это время относительно компактные зеленые ПЛ были представлены на рынке в основном ИК ЛД, работающими на второй гармонике (ВГ) [4.14]. Технологический прорыв 2010 г. в МОГФЭ А3-нитридов совершенный компанией OSRAM OS (Германия) [4.15] позволил создать прямо-излучающие зеленые лазеры на InGaN.

Через 2–3 года совместные усилия Sumitomo SEI и Sony AML [4.16] при участии Nichia Co. [4.17] увенчались демонстрацией непрерывных зеленых InGaN ЛД со временем жизни до 5000 ч., выращенных на полуполярных подложках GaN(11–22). Мелкие серии этих ПЛ уже предлагаются на рынке. Однако, истинно зеленый (0.55 мкм) и, в особенности, желтый диапазоны едва ли достижимы для лазеров на основе А3-нитридов в силу принципиальных технологических трудностей эпитаксиального роста КЯ InGaN/GaN с большим содержанием индия.

Поэтому чрезвычайно актуальной остается задача создания ПЛ с оптической и электронной накачкой (ПЛЭН) на основе гетероструктур широкозонных соединений A2B6 (ZnMgSSe/ZnCdSe), естественным образом перекрывающих практически весь видимый диапазон от синего до красного [4.11]. Ожидается, что срок службы таких ПЛ сможет достичь требуемого уровня в 10000 ч за счет отсутствия легирования p-типа ZnSe.

Средний ИК диапазон: лазеры, светодиоды, оптопары, матричные фотоприемники

Основные направления современных исследований и их практических применений. Излучатели и приемники среднего (2–6 мкм) и дальнего (6–15 мкм) ИК диапазонов на основе

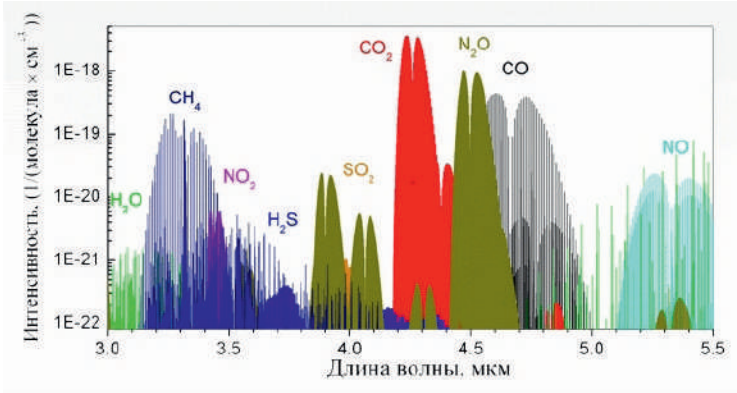


Рисунок 4.1 — Линии поглощения основных атмосферных и промышленных газов

Источник: [4.20]

эпитаксиальных гетероструктур A3B5 и A2B6 имеют чрезвычайно широкий спектр применений в различных сферах деятельности. ИК излучение глубоко проникает в органические, полимерные и биологические материалы так что мощные ЛД диапазона 2–3 мкм используются для обработки термопластиков, 3D конструирования, выпаривания воды, накачки более длинноволновых твердотельных и дисковых лазеров, и в медицине. Военные приложения включают противоракетную защиту и системы оптической связи в окнах прозрачности атмосферы (3–4 и 8–12 мкм). Излучатели на основе узкозонных материалов A3B5 обладают целым рядом преимуществ по сравнению с твердотельными лазерами и лазерами на основе солей свинца. К ним относятся компактность, эффективность, технологичность изготовления, возможность перестройки по длине волны излучения, больший срок эксплуатации (преимущественно при комнатной температуре), увеличение оптической мощности путем стекирования либо изготовления лазерных линеек.

Поскольку в данном спектральном диапазоне находятся линии поглощения основных природных и технических газов (Рисунок 4.1), то наиболее массовые применения такие излучатели (СД или ЛД) и ФП находят в газоанализаторах

и оптопарах, настроенных на достаточно узкий спектральный диапазон. Такие приборы используются в системах анализа состава атмосферы и контроля химических загрязнений, медицинской диагностики и системах химической безопасности. Кроме того, ИК ФП применяются в дефектоскопах, в радиометрах для дистанционного измерения температуры, для контроля процессов при обработке сверхтвердых материалов лазерным лучом и проч.

В Таблице 4.2 представлены основные типы эпитаксиальных гетероструктур A3B5 для излучателей среднего ИК-диапазона и их применения, а также основные компании-разработчики.

Новый этап развития ИК техники — разработка фокально-плоскостных двумерных многоэлементных матриц (FPA — Focal Plane Array). Они предназначены для поиска, обнаружения и распознавания теплоизлучающих и теплоотражающих объектов, систем космической оптической разведки, связи и наведения. Матричные приемники с высокой разрешающей способностью требуются также для обнаружения и слежения за наземными, надводными и подводными целями, в приборах ночного видения и тепловой разведки местности, системах переднего обзора летательных аппаратов и боевых машин пехоты, в миноискателях и лазерных дальномерах, в системах управления оружием. При этом основными преимуществами приборов на основе FPA являются отсутствие оптико-механической развертки изображения и соответственно малые масса, габариты и энергопотребление, бесшумная работа, высокое отношение сигнал/шум, качество изображения, широкий динамический диапазон, возможность связи с современными компьютерами, видео- и ТВ-аппаратурой, цифровая обработка изображения в реальном масштабе времени. На Рисунке 4.2 приведены основные материалы, используемые для создания FPA-матриц в среднем и дальнем ИК-диапазоне.

Востребованность направления и рыночные перспективы. В настоящее время рынок промышленно изготавливаемых ЛД и СД среднего ИК диапазона (2–5 мкм) относительно мал по сравнению с общим рынком лазеров всех типов, но темпы его развития (20% ежегодного прироста по данным 2014 г.) в 4 раза выше по сравнению с рынком лазеров в целом.

Таблица 4.2 — Лазеры и светодиоды среднего ИК-диапазона на основе гетероструктур А3В5

Приборы (диапазон длин волн)	Параметры (режим работы, рабочая температура, мощность)	Типы используемых гетероструктур (подложка)	Области применения	Основные компании-изготовители
1	2	3	4	5
Светодиоды (1.65–2.35 мкм)	непрерывный, 300K, ~1 мВт	AlGaAsSb/ GaInAsSb (GaSb)	Датчики газоанализаторов (CH_4, H_2O, CO_2)	Roithner-laser (Австрия) ИоффеЛЕД (Россия) IBSG Co., Ltd. (Россия) LED Micro-sensor NT
Светодиоды (2.9–4.6 мкм)	непрерывный, 300K, ~5–30 мкВт	InAsSb/ InAsSbP (InAs)		
Светодиоды (4.7–5.5 мкм)	импульсный, 300K ~10–20 мкВт	ноу-хау (InAs)		
Мощные лазерные диоды/ линейки (1.85–2.5 мкм)	непрерывный, 300K, до 1 Вт/10 Вт	структуры типа I (Al, Ga, In) (As, Sb) (GaSb)	Обработка материалов (термопластики), медицина (хирургия и терапия), выпаривание из материалов воды, накачка твердотельных и дисковых лазеров (2–4 мкм), военные применения (противоракетные меры). Лазеры на 2–2.3 мкм используются для спектроскопии следовых количеств газов, спектроскопии жидкостей, медицинской диагностики	M2K (Германия) IPG Photonics (США)

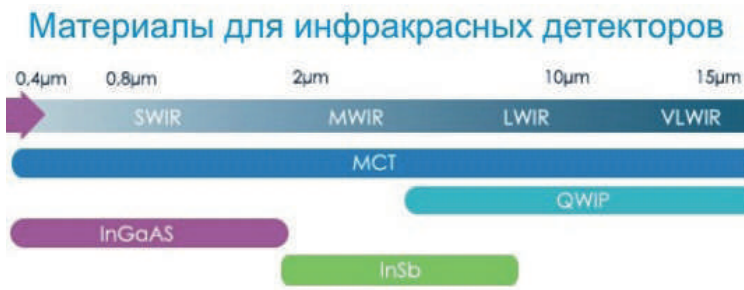
см. Окончание Табл. 4.2. на с. 53

Окончание Табл. 4.2.

1	2	3	4	5
Лазеры (DFB) с распределенной обратной связью (3–3.5 мкм)	непрерывный, 300K	Гетероструктуры с квантовыми ямами типа I	Детектирование метана, пропана, H_2O, CO_2	LAS Photonics (Израиль)
Каскадные (ICL) лазеры на межзонных переходах (3–6 мкм)	непрерывный, 300K, 20–100 мВт	GaInAsSb/ InAsSb/ InSb	Спектроскопия газов, детектирование метана, пропана, ацитилена и др., снижение загрязнения среды в химической промышленности, датчики NO, CO, CO_2 в процессах сгорания, медицинская диагностика (анализ выдыхаемого человеком воздуха)	LAS Photonics (Израиль), Nanoplus (Германия) Thales (Франция)
Квантово-каскадные (ККЛ, также QCL) лазеры на межподзонных переходах (3–11 мкм)	непрерывный, 300K, импульсный до 5 Вт	В основном InGaAs/ InAlAs (InP)		LAS Photonics (Израиль) Pranalytica (США) Daylight solutions (США), Block Engineering (США)

В 2013 г. ИК-сегмент рынка ЛД вышел на передовые позиции, оставив позади синие и красные ЛД видимого диапазона, и ожидается, что эта ситуация не изменится вплоть до 2020 г. [4.18]

Согласно данным обзора [4.20], военные бюджеты ряда стран находятся под сильным давлением вследствие глобального снижения темпов роста мировой экономики, особенно это заметно в США. Однако эскалация напряженности на Ближнем Востоке и геополитическое обострение в ряде стран Азии и Восточной Европы привело к некоторому росту оборонных бюджетов в странах Западной Европы. Это позволяет прогнозировать рост активности в сфере оборонных



SWIR, MWIR, LWIR и VLWIR — соответственно коротковолновый, средний, длинноволновый и сверх-длинноволновый ИК диапазоны. MCT — КРТ, QWIP — ИК ФП на основе гетероструктур с КЯ AlGaAs/GaAs.

Рисунок 4.2 — Основные материалы и эпитаксиальные гетероструктуры для тепловизионных матриц.

Источник: [4.19]

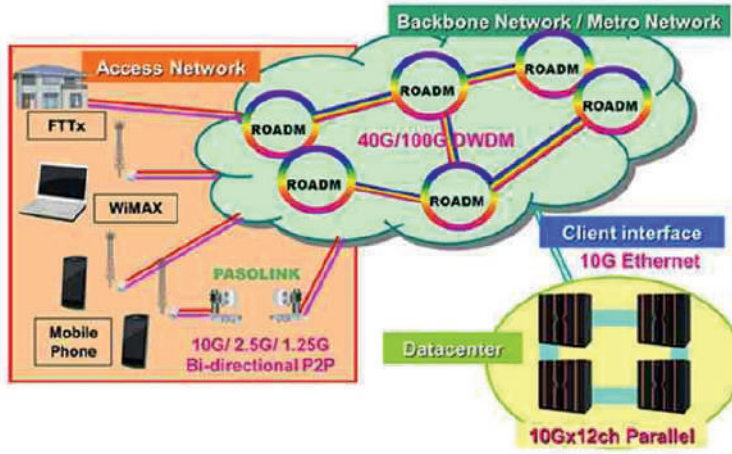
применений ИК-техники даже в условиях глобального экономического кризиса. Рынок дискретных ФП также демонстрирует значительный рост и к 2020 г. прогнозируется на уровне $704M [4.20].

Исключительно бурный рост ожидается в системах тепловизоров на основе матриц высокого разрешения. Согласно Yole Développement [4.22], к 2019 г. этот сегмент может вырасти в десятки раз [4.21]. Все возрастающие требования по разрешающей способности, быстродействию, температурной стабильности матричных ФП среднего ИК-диапазона являются движущей силой разработок и исследований принципиально новых перспективных материалов, в частности p-i-n диодов на основе InSb со встроенными гетеробарьерами и особенно сверхрешеток (СР) типа II на основе InAs/AlGaSb (T2SL). В последнем обзоре рынка ИК компонентов для военных применений за 2015 г. [4.18] приводятся все основные типы современных изделий и материалов, применяемых в настоящее время для создания ИК систем детектирования, и из девяти наиболее перспективных четыре позиции занимают именно гетероструктуры A3B5.

Научные и технологические барьеры развития ИК фотоприемников. Разработка матричных элементов является достаточно сложной технической и научной задачей. Основной материал ИК оптоэлектроники — КРТ (CdHgTe) в высокой степени неоднороден, что приводит к проблемам при создании FPA. В этих условиях все большую значимость приобретают гетероструктуры узкозонных полупроводников A3B5 и современные технологии, такие как МПЭ и МО ГФЭ, которые позволяют получать высокооднородные гетероструктуры большой площади. В частности, активно разрабатываются детектирующие приборы на основе гетероструктур T2SL InAs/GaInSb и InAs/Al(Ga)Sb. Однако технология формирования многопериодных СР требует прецизионного контроля за всеми технологическими параметрами, что делает задачу получения таких структур очень трудоемкой, не уступающей по сложности технологии квантово-каскадных лазеров (ККЛ). Кроме того, к настоящему времени недостаточно отработаны пострстовые процедуры, в первую очередь, связанные с пассивированием поверхности, что приводит к заметным утечкам и высоким темновым токам. Все же, высокий потенциал T2SL структур делает их объектом пристального внимания ведущих научных групп по всему миру.

Источники и приемники терагерцового диапазона (0.1–10 ТГц)

Востребованность направления и рыночные перспективы. Терагерцовая (ТГц) область спектра представляет особый интерес. Это обусловлено большой проникающей способностью ТГц излучения и возможностью неразрушающей идентификации различных химических и биологических веществ, имеющих специфические линии поглощения в диапазоне 30–300 мкм. В качестве основных областей применения ТГц технологий необходимо выделить: системы безопасности и антитеррористического контроля на транспорте для обнаружения скрытых биологических угроз и взрывчатых веществ, экологический мониторинг окружающей среды, промышленный контроль в производстве полимеров, дефектоскопию, радиоастрономию, медицину, в частности стоматологию, и биологию. Согласно прогнозу BCC Research



IMPATT — лавинно-пролетный диод;
TUNNET — инжекционный туннельный диод;
SLED — суперлюминесцентный СД;
RTD — резонансно-туннельный диод;
HBT — гетеробиполярный транзистор.

Рисунок 4.3 — Данные по предельным частотам в диапазоне 0.1–0.6 ТГц и мощностям для электронных устройств типов 2 и 3.

Источник: [4.24]

(Business Communication Company, Inc.) глобальный рынок излучателей ТГц диапазона и различных систем, включающих излучатели и приемники, составил $54.7M в 2014 году и при годовом росте 40.4% может достичь $298.5M в 2019 и превысить $1B в 2024 [4.23].

Среди традиционно разрабатываемых устройств субмиллиметровой электроники на основе твердотельных полупроводниковых гетероструктур, которые к настоящему времени практически дотянулись до диапазона 1–2 ТГц, хотя и с мощностью, не превышающей 100 мкВт, следует отнести умножители частоты на основе диодов Шоттки (GaAs, InP) и гетеропереходных варакторов, усилители мощности и осцилляторы на основе гетеробиполярных транзисторов и гетероструктурных полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов (high electron mobility transistor: HEMT-транзисторы

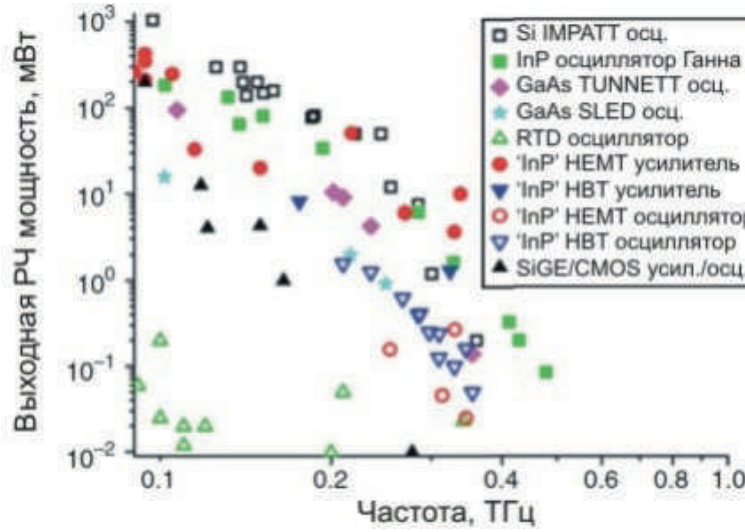


Рисунок 4.4 — Структура современной многоуровневой телекоммуникационной системы

Источник: [4.25]

в системе AlInGaAs), а также двухконтактные устройства на основе резонансно-туннельных диодов, диодов Ганна и блоховских полупроводниковых сверхрешеток (СР) [4.24]. Спектральный диапазон последних двух типов устройств, при мощности ~100 мкВт, пока ограничен 0.5 ТГц, но что существенно, при комнатной температуре (Рисунок 4.3).

4.1.2. Телекоммуникационные излучатели и фотоприемники

Современные телекоммуникационные системы (от латинского *tele* — «вдаль», «далеко») представляют собой совокупность аппаратно- и программно-совместимого оборудования, объединенную в единую систему каналами связи и выполняющую функции обмена информацией всех форм (текстовой, графической, аудио или видео) между отдельными устройствами или системами, удаленными друг от друга. Эти системы лежат в основе функционирования всех

жизненно важных систем современной цивилизации: финансовой, транспортной, энергетической, социальной, коммуникационной и т. д. Типичная структура современной многоуровневой телекоммуникационной системы приведена на Рисунке 4.4.

В структуре телекоммуникационной системы выделяются несколько основных компонентов: магистральная сеть (backbone network) или общегородская сеть (metropolitan area network — MAN), центры обработки и хранения данных (datacenter), соединенные с магистральной сетью через высокоскоростные каналы обмена (client interface), и сеть доступа (access network), соединяющая отдельных абонентов с магистральной сетью через различные типы каналов информационного обмена. Характерные скорости информационного обмена для сетей различного уровня указаны на Рисунке 4.4. В предельном случае магистральная сеть может охватывать территорию нескольких государств, а скорость передачи по отдельным информационным каналам достигает сотен Гбит/с [4.26].

Физическая реализация масштабных высокоскоростных телекоммуникационных систем стала возможной исключительно благодаря развитию волоконно-оптических систем передачи информации (ВОСП). Оптическое волокно (ОВ) как среда передачи данных обладает уникальным сочетанием низких потерь (до нескольких десятых дБ по падению уровня мощности сигнала на один километр длины оптического волокна) и огромной широкополосностью, позволяющей передавать информационные потоки со скоростями до 1 ТБит/с (для одномодовых оптических волокон). По этой причине магистральные/общегородские сети и высокоскоростные каналы обмена с центрами обработки/хранения данных в современных телекоммуникационных системах реализуются исключительно на основе оптических технологий. Начав с единичных каналов в спектральных диапазонах 1.3 мкм (1-ое поколение) и 1.55 мкм (2-ое поколение), уже с конца 90-х годов разработчики магистральных ВОСП стали активно использовать технологию мультиплексирования в частотной области (Wavelength Division Multiplexing — WDM), которая позволяет передавать по одному волокну несколько независимых информационных пото-

ков на оптически различных несущих длинах волн. На практике в магистральных сетях преимущественно используется технология DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing). Частотный план для DWDM систем определяется стандартом ITU G.694.1. ITU рекомендует использовать в DWDM системах C (1525…1565 нм) и L (1570…1610 нм) окна прозрачности ОВ. В каждый диапазон попадают по 80 каналов с шагом 0.8 нм (100 ГГц). На практике обычно используется только C диапазон. WDM системы предъявляют ряд дополнительных требований к компонентам, по сравнению с обычными ВОСП (малая ширина спектра источника излучения, использование узкополосных оптических фильтров). Стоимость таких систем существенно выше, но это компенсируется их высокой информационной емкостью.

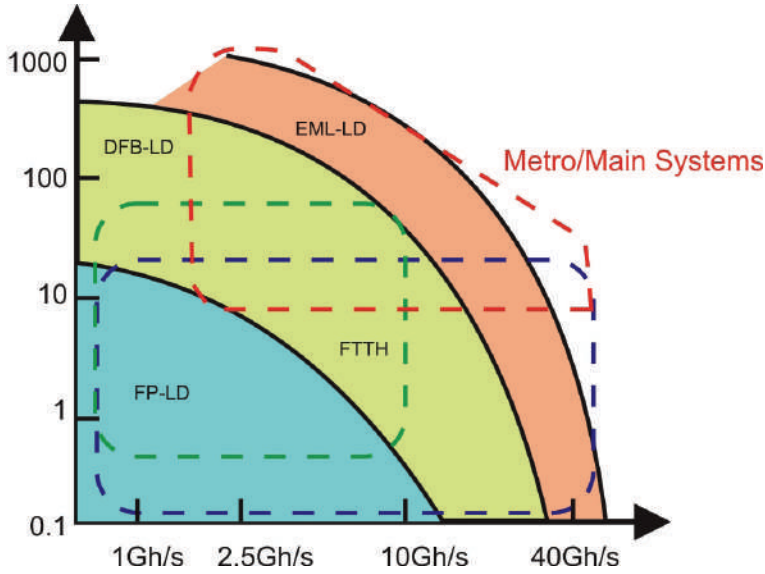
Что касается каналов связи с отдельными абонентами и каналов внутреннего информационного обмена, то здесь, в зависимости от конкретных обстоятельств, находят применение как оптические, так и электрические проводные (витая пара, коаксиальный кабель) и беспроводные (мобильные) технологии. Современное состояние развития ВОСП к концу 2010-х годов достаточно подробно рассмотрено в сборнике [4.27]. Однако технические детали, касающиеся современных тенденций и перспектив развития активных компонентов ВОСП (излучателей и фотоприемников) остались за пределами рассмотрения указанной работы. Первоначально технологии передачи данных по оптическим волокнам были внедрены в конце 70-х –начале 80-х годов XX столетия в области телефонии и телевидения. В первые десятилетия основные усилия были направлены на увеличение предельного расстояния передачи больших потоков данных с минимальным количеством промежуточных ретрансляторов. Развивалась инфраструктура на основе оптических кабелей с одномодовыми волокнами, источниками и приемниками для «второго» (длины волн вблизи 1310 нм) и «третьего окна» (длины волн в окрестности 1550 нм) стандартного кварцевого ОВ. Второе окно соответствует минимуму дисперсии, а третье — минимальному уровню потерь сигнала. В системах передачи информации на большие (100–10000 км) и средние (1–100 км) расстояния в настоящее время используются исключительно ВОСП, работающие в указанных спектральных

диапазонах [4.28, 4.29]. В последние 5–10 лет оптические технологии начали активно использоваться для реализации каналов внутреннего информационного обмена в центрах обработки данных, суперкомпьютерах и локальных сетях (local area network — LAN), для абонентского доступа (fiber to the home — FTTH) с использованием сетей по технологии PON (passive optical network), технологии «облачных» вычислений и др [4.30] (см. обозначения на Рисунке 4.4)

Там, где дальность передачи ограничена несколькими сотнями метров, успешно используются системы, работающие в «первом окне», соответствующем длинам волн вблизи 850 нм.

Основные направления исследований и их применений. Барьеры развития — научные и технологические

Можно классифицировать разработки излучателей и приемников по рабочим длинам волн, конкретным типам конструкций приборов (лазеры с резонатором Фабри-Перо, лазеры с распределенной обратной связью и т. п.) или уровню быстродействия. В настоящем разделе рассмотрение основных тенденций и перспектив развития излучателей и фотоприемников проводится, базируясь на уровне телекоммуникационных сетей или систем в которых они используются. Это магистральные телекоммуникационные сети (MAN), источники и приемники излучения для которых собственно и принято относить к телекоммуникационным источникам и приемникам, сетям абонентского доступа (FTTH) и внутрисистемным каналам информационного обмена (LAN). Указанные области применения существенно отличаются как по характерной дальности передачи, так и по объему информационных потоков, что накладывает определенные ограничения на возможность эффективного использования тех или иных активных компонентов и определяет направления исследований по их совершенствованию. В настоящем разделе основное внимание направлено на рассмотрение источников и приемников для телекоммуникационных систем большой и средней дальности.



FP-LD — ЛД с резонатором Фабри-Перо без стабилизации частоты;
DFB-LD (Distributed-Feedback laser diode) — ЛД с распределенной обратной связью (РБО);
EML-LD (Electro-absorption Modulated Laser) — ЛД с РБО и дополнительной секцией модулятора на эффекте изменения поглощения при изменении величины электрического поля.

Рисунок 4.5 — Примерное распределение типов лазерных диодов (ЛД) по областям применения в телекоммуникационных системах.

Источник: [4.31]

Полупроводниковые излучатели. На Рисунке 4.5 приведена диаграмма, качественно отражающая возможности использования определенных вариантов конструкции полупроводниковых лазерных диодов (ЛД) в системах различного уровня.

Работающие в режиме прямой токовой модуляции ЛД с резонатором Фабри-Перо (как правило, пространственно-одномодовые приборы без принудительной стабилизации частоты выходного излучения, с шириной спектра выходного сигнала порядка единиц нм), пригодны для использования

в системах с относительно малой дальностью и на скоростях до 10 Гбит/с [4.32]. Они обладают простой конструкцией и низкой стоимостью сравнительно с ЛД с распределенной обратной связью (РБО ЛД, англоязычное название DFB LD — distributed feedback laser diode), в которых за счет стабилизации частоты выходного излучения ширина спектра выходного сигнала на один-два порядка ниже. Минимизация влияния дисперсии ОВ для РБО ЛД позволяет обеспечить дальности передачи в десятки километров при работе в режиме прямой токовой модуляции на скоростях порядка 10–25 Гбит/с [4.33]. Однако наилучшие характеристики обеспечивают ЛД с РБО и дополнительной секцией электрооптического модулятора, использующего эффект изменения поглощения при изменении величины электрического поля (т. н. EML LD — electro-absorption modulated laser) [4.34]. В таких излучателях активная секция с РБО работает в стационарном режиме, а на секцию электрооптического модулятора подается управляющее напряжение, пропорциональное информационному сигналу. EML LD наиболее сложны в изготовлении, но обеспечивают наилучшие характеристики по скорости модуляции и ширине спектра выходного сигнала [4.35]. Следует отметить, что на диаграмме, представленной на Рисунке 4.5, не отражены полупроводниковые вертикально-излучающие лазеры (VCSEL — vertical-cavity surface-emitting laser), представляющие собой относительно новый тип лазерных диодов, обладающий интересными конструктивными особенностями и специфическими характеристиками, обеспечившими в последние годы их практическое доминирование в некоторых телекоммуникационных системах с большим числом достаточно скоростных (10–25 Гбит/с) каналов малой дальности (до нескольких сотен метров).

Современные тенденции развития приемопередающих модулей для телекоммуникационных сетей Ethernet отражены на Рисунке 4.6. Как следует из представленных данных, появление технологии передачи информационного потока по сетям Ethernet со скоростью 100 Гбит/с привело к активному замещению систем со скоростями 10 Гбит/с. При этом появление систем со скоростями передачи 40 Гбит/с и 100 Гбит/с стало возможным благодаря развитию технологий источников лазерного излучения [4.36].

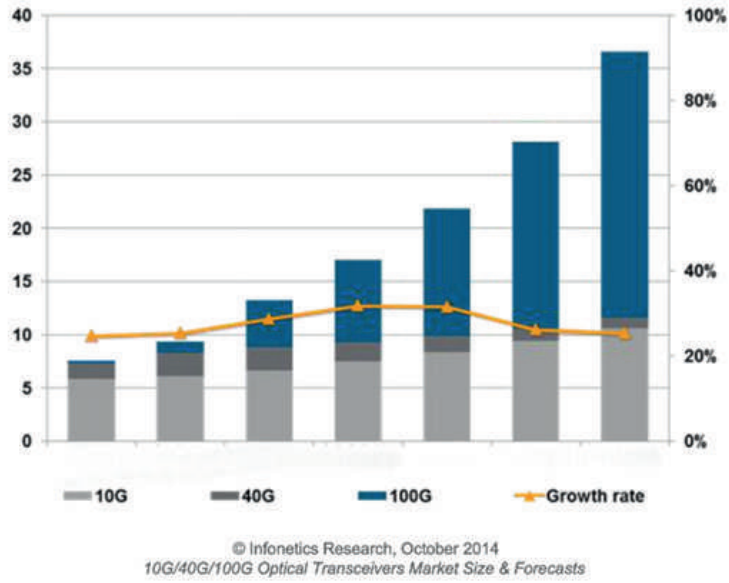


Рисунок 4.6 — Сравнительная динамика (факт и прогноз) развития технологий передачи данных по магистральным сетям Ethernet на скоростях 10 Гбит/с, 40 Гбит/с и 100 Гбит/с

Источник: [4.37]

Что касается систем материалов, используемых для создания ЛД, их выбор в первую очередь определяется диапазоном рабочих длин волн. Для первого окна (в районе 850 нм), используемого в локальных сетях и внутрисистемных информационных каналах, традиционно используются гетероструктуры в системе материалов InGaAlAs, выращиваемые на подложках GaAs [4.36]. Однако для магистральных телекоммуникационных систем используются исключительно второе (1310 нм) и третье (1550 нм) окна. Исторически в этой спектральной области развивались ЛД на основе гетероструктур в системе материалов InGaAsP/InP, позволяющие обеспечить согласование постоянных кристаллической решетки отдельных слоев лазерной структуры с подложкой InP и настройку на нужную длину волны излучения за счет

выбора нужных составов четырехкомпонентного твердого раствора InGaAsP с двумя элементами III и V групп.

В результате исследований за последние 10–15 лет существенно расширилась номенклатура материалов, доступных для реализации ЛД в диапазоне рабочих длин волн магистральных ВОСП. На Рисунке 4.7 обозначены диапазоны длин волн, перекрываемые ЛД на основе той или иной системы материалов, и их соответствие спектральной зависимости потерь пропускания для современных одномодовых кварцевых ОВ, представленной на нижнем графике. Обозначены стандартные «окна», выделенные для реализации систем WDM.

Интерес к поиску альтернативных систем материалов обусловлен недостаточной эффективностью прямой токовой модуляции и низкой температурной стабильностью ЛД на основе структур InGaAsP/InP [4.38], что связанно со специфическим распределением энергетических разрывов зон между зоной проводимости и валентной зоной в активной области на основе квантовых ям (КЯ) InGaAsP [4.39]. Наибольшие практические успехи достигнуты при использовании системы материалов InGaAlAs/InP, в которой за счет увеличения энергетического барьера для электронов в зоне проводимости удается повысить температурную стабильность, а за счет некоторого уменьшения барьера для дырок в валентной зоне — увеличить эффективность прямой токовой модуляции путем более однородной инжекции дырок в несколько активных слоев с КЯ [4.40]. Материалы на подложках GaAs потенциально интересны как с точки зрения улучшения температурной стабильности телекоммуникационных лазеров, так и ввиду более технологичной, прочной и дешевой подложки GaAs. К ним относятся лазерные наногетероструктуры с квантовыми точками (КТ) (Ga)InAs — (Ga)InAs, а также гетероструктуры разбавленных нитридов с добавлением азота в качестве основного компонента с более узкой запрещенной зоной и, соответственно, большей длиной волны излучения (InGaAsN(Sb)). Сурьма в данном случае используется для улучшения однородности твердого раствора и планарности гетеослоев при больших концентрациях азота. В качестве технологий для получения лазерных гетероструктур используются газофазная эпитаксия из паров металлорганических

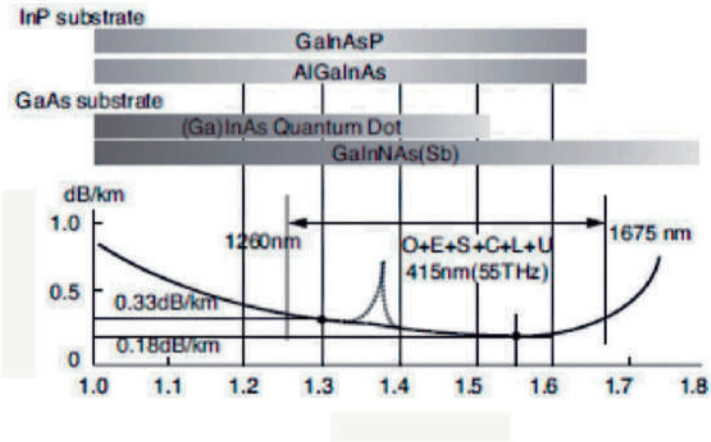


Рисунок 4.7 — Основные системы материалов для лазерных диодов, предназначенных для использования в магистральных телекоммуникационных сетях.

Источник: [4.41]

соединений (ГФЭ МО) или (в несколько меньшей степени) молекулярно-пучковая эпитаксия (МПЭ).

Серьезным ограничением для телекоммуникационных источников на основе DFB лазеров с прямой схемой модуляции является невысокое быстродействие (обычно ~2.5 Гбит/с при дальности передачи ~100 км), характерное как для охлаждаемых [4.42], так и для неохлаждаемых приборов [4.43]. Однако в наиболее передовых разработках для DFB лазеров в системе InGaAsP/InP в режиме прямой токовой модуляции удалось добиться скорости 10 Гбит/с [4.44] при рабочей температуре 100° С, что позволит эффективно использовать такие приборы в неохлаждаемых приемопередающих модулях для сетей 10Gbit Ethernet. Предложенная конструкция кристалла ЛД схематически показана на Рисунке 4.8.

Столь высокие характеристики обеспечиваются гетероструктурой с эпитаксиально-зарощенным волноводом (т.н. buried heterostructure), выращенной на полуизолирующей подложке InP, причем в качестве компенсирующей примеси, обеспечивающей изолирующие свойства блокирующего ток

слоя InP, вместо обычно применяемого железа использован рутений. Последний предотвращает нежелательную диффузию примеси p-типа (цинка), в результате чего пороговый ток лазера уменьшается, а выходная мощность увеличивается.

Кардинально увеличить скорость передачи данных позволяет использование внешней схемы модуляции, на практике наиболее часто реализуемой в виде интегрального электрооптического модулятора в составе кристалла ЛД (Рисунок 4.9).

В ЛД с интегральным оптическим модулятором лазерный волновод в продольном направлении состоит из трех основных частей — активной секции, секции модулятора и расположенной между ними изолирующей области. Активная секция и секция модулятора имеют индивидуальные контакты, при этом для снижения паразитной емкости контактную площадку модулятора располагают на толстом слое диэлектрика. Внедрение таких лазеров позволило еще в начале 2000-х успешно реализовать приемопередающие модули со скоростью передачи данных 10 Гбит/с [4.45]. Однако наибольшие успехи были достигнуты за счет объединения возможностей ЛД с интегральным оптическим модулятором и физических преимуществ системы материалов InGaAlAs/InP.

На Рисунке 4.10 представлен вариант конструкции современного лазерного диода с электрооптическим модулятором [4.47], для которого характерно использование узкого волновода (шириной примерно 2 мкм), составленного в продольном направлении из трех основных частей (активной секции длиной 450 мкм, секции модулятора 150–200 мкм и изолирующей области между ними 50 мкм). Сигнальные контактные площадки активной секции ЛД и секции электрооптического модулятора размещены на толстом слое диэлектрика (в данном случае бензоциклобутена — BCB) с низким значением диэлектрической проницаемости. Применено антиотражающее покрытие со стороны модулятора и высокоотражающее покрытие с противоположной стороны. В качестве активной области использован набор квантовых ям InGaAlAs. В зависимости от особенностей конструкции модулятора рассмотренный ЛД обеспечивает передачу информации со скоростью 10 Гбит/с на расстояние 80 км в диапазоне рабочих температур от –25 до 100° С, а для скорости передачи

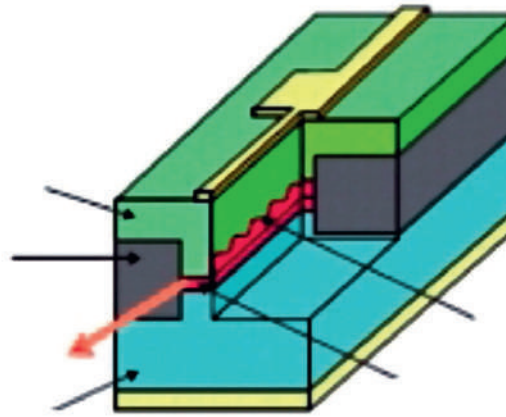


Рисунок 4.8 — Конструкция кристалла InGaAsP DFB лазера, обеспечивающего скорость передачи данных 10 Гбит/с при рабочей температуре 100 °С в режиме прямой токовой модуляции

Источник: [4.44]

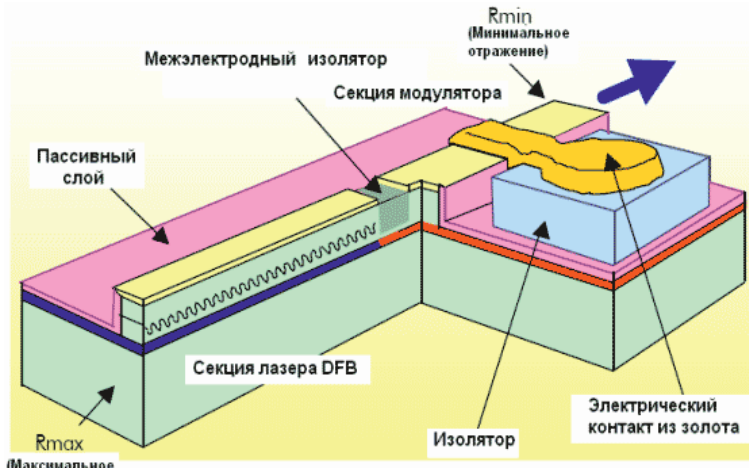
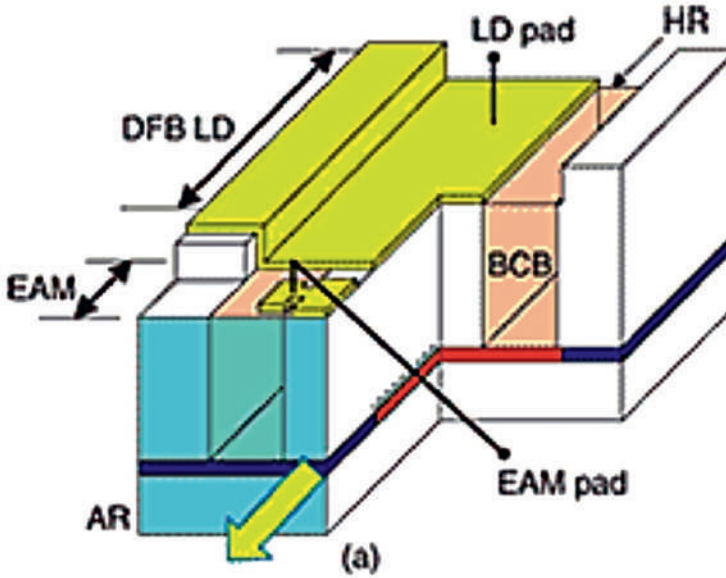


Рисунок 4.9 — Схема конструкция кристалла DFB лазера с интегральным электрооптическим модулятором на эффекте поглощения

Источник: [4.46]





(b)

Рисунок 4.10 — Схема конструкция кристалла современного температурно-стабильного DFB лазера с интегральным электрооптическим модулятором на эффекте поглощения, обеспечивающего передачу данных на скоростях 10 Гбит/с и 40 Гбит/с

Источник: [4.48]

40 Гбит/с на расстояние 2 км диапазон рабочих температур составляет от –15 до 80° С.

Выше в основном рассматривались ЛД потенциально пригодные для использования в магистральных телекоммуникационных системах, где доминируют технологии DWDM. В то же время в задачах обеспечения доступа абонентов или подключения центров обработки информации к магистральным сетям существуют свои специфические требования. В этом случае дальность передачи не превышает нескольких сотен метров, но возрастает важность обеспечения высокоскоростной работы в широком диапазоне температур без использования систем стабилизации, снижения энергопотребления и стоимости в расчете на один бит передаваемой информации. В данном классе задач широкое применение находят ЛД, работающие во втором окне, т. е. вблизи длины волны минимальной дисперсии стандартного кварцевого ОВ (~1310 нм). Здесь основные усилия разработчиков сосредоточены на внедрение ЛД на основе системы материалов InGaAlAs/InP, обеспечивающих неоспоримые преимущества с точки зрения реализации высокоскоростной работы без принудительной стабилизации температуры. Можно отметить такие результаты, как демонстрация возможности обеспечения скорости передачи 10 Гбит/с на расстояние не менее 2 км в диапазоне рабочих температур от –15 до 85° С для ЛД с резонатором Фабри-Перо [4.49] и последующая демонстрация диапазона рабочих температур выше 100° С [4.50]. В настоящий момент технология ЛД на основе гетероструктур InGaAlAs/InP успешно внедрена в промышленность.

Как уже отмечалось, разработки телекоммуникационных лазерных источников не исчерпываются системами материалов InGaAsP и AlInGaAs на подложках InP. В конце 1990-х –начале 2000-х в поисках путей улучшения температурной стабильности телекоммуникационных лазерных излучателей и создания лазеров типа VCSEL для диапазона 1300/1550 нм наблюдался всплеск активности в исследованиях длинноволновых лазерных излучателей на подложках GaAs [4.51].

Одним из основных направлений стала разработка лазеров в системе InGaAs(N) на основе напряженных гетероструктур. Было показано, что добавление азота в квантовую яму

InGaAs позволяет расширить спектральный диапазон работы ЛД на подложках GaAs до второго окна и удалось реализовать как классические ЛД с резонатором Фабри-Перо, так и лазеры типа VCSEL [4.52]. Температурная стабильность таких приборов оказалась существенно выше, чем у ЛД на основе InGaAsP. Исследования в указанном направлении, в частности, успешно проводились в ФТИ им. А.Ф. Иоффе в кооперации с Тайваньским институтом индустриальных технологий [4.53]. Дальнейшие исследования выявили технологические проблемы, связанные с крайне высокими требованиями к качеству подготовки эпитаксиального оборудования, большой неравномерности параметров по площади пластины и нестабильной деградационной устойчивостью ЛД на основе InGaAs(N), что привело к спаду активности в данной области.

Другим интересным направлением, послужившим предметом совместных исследований ФТИ им. А. Ф. Иоффе и Берлинского Технического университета, стала разработка длинноволновых лазерных излучателей на основе массивов самоорганизующихся квантовых точек (КТ) в системе InGaAs/GaAs [4.54]. Здесь отечественными исследователями были выполнены пионерские работы [4.55], в том числе впервые в мире продемонстрирован монолитно выращенный на подложке GaAs лазер типа VCSEL спектрального диапазона 1300 нм [4.56]. Впоследствии технология классических ЛД на основе InGaAs КТ была внедрена в стартапом компании Innolume GmbH [4.57], а несколько позднее получила развитие в японской QD Laser, Inc [4.58]. Указанные производители предлагают образцы ЛД спектрального диапазона 1240–1300 нм с рекордно высокой температурной стабильностью. Несмотря на то, что максимальная скорость передачи для промышленных образцов ЛД на InGaAs КТ не превышает 2.5 Гбит/с, опубликованные данные позволяют ожидать существенного улучшения частотных характеристик [4.59].

История разработок лазеров типа VCSEL для систем телекоммуникации насчитывает уже более 20 лет. В настоящее время VCSEL в системе материалов AlGaAs/GaAs, работающие в диапазоне первого окна (вблизи 850 нм) являются наиболее массовым типом выпускаемых ЛД и преимущественно используются в оптических датчиках, сенсорах и высокопро-

изводительных внутрисистемных ВОСП (центры обработки данных, суперкомпьютеры) [4.60]. В то же время, в области более длинноволновых VCSEL (длина волны излучения больше 1.1 мкм) до сих пор существует только мелкосерийное производство приборов в достаточно сложных вариантах конструкции (например, спекание активной области на основе InGaAlAs с распределенными брэгговскими отражателями на основе AlGaAs/GaAs) [4.61]. Хотя характеристики созданных недавно образцов, например, с использованием субволновых высококонтрастных отражателей, удовлетворяют требованиям ряда телекоммуникационных применений (выходная мощность в одномодовом режиме более 1 мВт, длина волны излучения вблизи 1570 нм, предельная скорость передачи данных по одномодовому волокну на расстояние 2.5 км более 5 Гбит/с, диапазон рабочих температур до 65° С) [4.62], стоимость таких приборов оказывается сравнительно высокой, а характеристики все-таки уступают лучшим ЛД классической конструкции. Можно констатировать, что проблема разработки технологии длинноволновых VCSEL, сопоставимой по технико-экономическим характеристикам с промышленной технологией VCSEL диапазона 850 нм пока окончательно не решена, в первую очередь из-за низкого оптического усиления или недостаточной стабильности характеристик всех разработанных к настоящему вариантов активных областей, которые могут быть эпитаксиально выращены на подложках GaAs [4.63].

Полупроводниковые фотоприемники (фотодиоды), как и полупроводниковые лазеры, являются ключевыми активными компонентами оптических телекоммуникационных систем, определяющими их предельные характеристики. Несмотря на огромное разнообразие конструкций, в телекоммуникационных системах в основном находят применение два типа фотодиодов: PIN фотодиоды и лавинные фотодиоды (ЛФД, англ. APD — avalanche photodiode). Выбор конкретного материала для реализации фотодетектора определяется рабочим спектральным диапазоном. Базовая технология получения полупроводниковых структур и гетероструктур, как и в случае лазерных источников — ГФЭ МО. МПЭ используется существенно реже ввиду необходимости выращивания более толстых слоев, характерных для фотоприемников.

В Таблице 4.3 приведено качественное сопоставление двух указанных типов фотоприемников с точки зрения использования в телекоммуникационных системах [4.64].

Как следует из приведенных в таблице данных, PIN фотодиоды и ЛФД имеют близкие диапазон рабочих длин волн и характерные значения полосы рабочих частот. Из-за наличия механизма внутреннего усиления ЛФД заметно выигрывают по величине максимальной чувствительности, однако требуют более сложной схемотехники, стабилизации температуры, обладают дополнительными шумами лавинного умножения и имеют существенно более сложную и дорогую технологию изготовления.

PIN фотодиоды активно используются в высокоскоростных локальных сетях и внутрисистемных каналах передачи данных, где они успешно демонстрируют работу в многоканальных системах со скоростью передачи 25 Гбит/с на один канал [4.65]. В качестве примера возможности достижения высоких скоростных характеристик PIN фотодиодов классической конструкции можно привести разработку компании Finisar (США) — приемный модуль MPDV1120RA в корпусе типа butterfly со встроенным трансимпедансным усилителем, предназначенный для работы в спектральном диапазоне 1525–1570 нм со скоростью передачи 40 Гбит/с, в диапазоне рабочих теператур от 0 до 75° С в системах средней и большой дальности [4.66].

ЛФД преимущественно находят применение в магистральных телекоммуникационных сетях, где для увеличения дальности передачи требуется максимальная чувствительность фотоприемника [4.67]. Ведутся активные исследования по поиску новых конструктивных решений для улучшения частотных характеристик и продвижения в диапазон скоростей передачи более 25 Гбит/с. В качестве примера, иллюстрирующего комплексный подход к совершенствованию ЛФД для телекоммуникационных систем, на Рисунке 4.11 приведено схематическое поперечное сечение ЛФД, разработанного компанией NTT, в котором использована концепция «фотодиода с максимальным наведенным током» (maximized-induced-current photodiode) [4.68].

Общепринятым показателем качества, характеризующим ЛФД, является произведение фактора умножения и полосы

Таблица 4.3 — Сравнительные характеристики PIN фотодиодов и ЛФД применительно к задачам использования в телекоммуникационных системах

Характеристика	PIN фотодиоды	Лавинные фотодиоды (ЛФД)
Система материалов	Si, Ge, InGaAs	Si, Ge, InGaAs (InAlAs)
Диапазон рабочих длин волн (зависит от конкретного материала)	600–1800 нм	600–1800 нм
Чувствительность	0.5–1.0 А/Вт	0.5–100 А/Вт
Полоса рабочих частот	постоянный сигнал ~40 ГГц	постоянный сигнал ~40 ГГц
Необходимые дополнительные электронные цепи (кроме смещения/съема сигнала)	нет	Стабилизированное высокое напряжение смещения, стабилизация температуры
Примерная стоимость (приемный модуль с волоконным входом)	1–500 долл. США	100–2000 долл. США

рабочих частот (по спаду амплитудно-частотной характеристики на 3 дБ). Это произведение зависит от свойств материала в зоне умножения и ее толщины. В представленной конструкции разработчики использовали в зоне умножения InAlAs. Кроме того, они применили инвертированную конструкцию, расположив область n-контакта сверху, что позволило пространственно ограничить область высоких полей и улучшить надежность, устранив деградацию, вызванную поверхностными токами утечки. Возможные проблемы с пробоем по краю контактной области были решены введением дополнительного буферного слоя, а вся приборная структура формировалась исключительно методами эпитаксиального выращивания, без использования диффузии или ионной имплантации. В результате удалось достичь рекордного уровня характеристик: максимальной полосы рабочих частот 23 ГГц при уровне чувствительности больше 9 А/Вт.

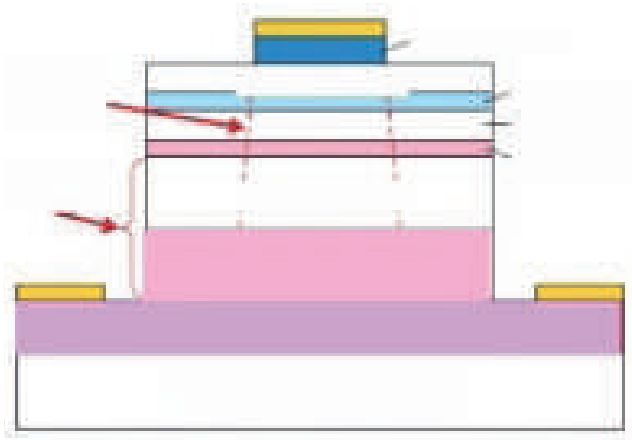


Рисунок 4.11 — Схематическое поперечное сечение ЛФД, разработанного компанией NTT

Источник: [4.68]

Дальнейшее улучшение частотных характеристик PIN фотодиодов связано с поиском новых конструктивных решений. В частности, активно развивается предложенная в середине 1990-х конструкция «фотодиодов с движением носителей одного типа» (uni-traveling-carrier photodiode — UTC-PD) [4.69]. В этих приборах свет поглощается в необедненном узкозонном слое p-типа, и фотовозбужденные электроны диффундируют из него в широкозонный дрейфовый слой (коллектор).

В такой конструкции эффект насыщения пространственного заряда существенно уменьшается по сравнения с классической схемой PIN-фотодиода, поскольку активными носителями фактически служат только электроны, имеющие существенно более высокую дрейфовую скорость по сравнению с дырками. Развитие данной концепции позволило не только достичь рекордной полосы рабочих частот более 300 ГГц, но и разработать на базе таких фотодиодов модуль смесителя ТГц-диапазона [4.70].

Востребованность направления и рыночные перспективы

Оценку объемов и перспектив рынка излучателей и приемников для телекоммуникационных систем целесообразно проводить, ориентируясь на лазерные диоды, как ключевой элемент приемопередающих модулей. На сегодняшний день они являются самым массовым продуктом среди телекоммуникационных компонентов. Анализ состояния дел и рыночных перспектив в рассматриваемой области содержится в обзоре [4.71]. Лазеры для телекоммуникационных систем составляют около 30% от общего объема рынка лазеров всех типов который в период 2012 до 2015 г вырос с 8.7 до 10 млрд. долларов США, при этом на долю ЛД приходится около 43%. Итоговая оценка дает объем рынка для лазерных диодов (ЛД), используемых в системах телекоммуникаций, передачи данных и оптических системах записи около 3.5 млрд. долл. США в 2016 г. Скорость роста данного рынка в последние 5 лет стабильно держится на уровне около 3% в год, при этом на Северную Америку, Европу (ЕЭС) и Азиатские страны Тихоокеанского региона приходится около 95% общего объема. Таким образом, рынок телекоммуникационных лазеров в целом характеризуется слабой динамикой роста, ограниченным объемом и высокой конкуренцией ведущих мировых производителей. Определенное исключение составляет рынок активных оптических кабелей (АОК), использующих в качестве источников излучения лазеры типа VCSEL, которые все шире внедряются в задачах многоканальной передачи больших массивов данных на сравнительно близкие расстояния (центры обработки данных, суперкомпьютеры, подключение оконечной аппаратуры и др.). Здесь прогнозируется экспоненциальный рост объема рынка с 400 млн. долларов США в 2014 г. до 3.5 млрд. долл. в 2022 г.

4.2. Оптические межсоединения и кремниевая нанофотоника

4.2.1. Введение

Ключевые технологии фотоники в наномасштабах, или *нанофотоники* охватывают широкий спектр приложений [4.72–4.74], включая оптические пинцеты с мульти-ловушками, оптический захват холодных атомов, молекулярную сортировку и формирование изображений в голографической литографии.

В фокусе внимания нанофотоники — с использованием как полупроводниковых, так и плазмонных материалов — находится конструирование, манипулирование и описание оптически активных наноструктур, открывающих новые возможности в таких областях, как информационные и коммуникационные технологии, совершенствование солнечных элементов и источников света, создание инструментов для визуализации объектов в нанометровом диапазоне размеров, молекулярное обнаружение в химии и биомедицине. Нанофотоника нацелена на создание информационных систем с плотной компоновкой элементов и низким уровнем рассеяния мощности, рост пространственного разрешения изображений и появление новых сенсоров с повышенной чувствительностью и избирательностью. Упомянем, что лабораторные демонстрации методов плазмоники были успешными для таких применений как компьютерные микросхемы [4.73]. Основным ограничением таких применений является светоиндуцированный нагрев металлических структур, который оказывает сильное влияние на передачу информации по плазмонным световодам на значительные расстояния [4.74]. Источники, способные эффективно связывать квантовые излучатели определенной коллективной модой колебаний электронов в наночастице (плазмонные источники), могут быть востребованы прежде всего в задачах квантовой плазмоники, а затем и для создания энергоэффективных источников света на уровне микросхем [4.75, 4.76]. Чрезвычайно важным прорывом в этом отношении стало предсказание [4.77] и реализация [4.78–4.81] когерентных нанометаллических источников света, названных нанолазерами.

После бурного роста числа научных публикаций на тему кремниевой фотоники основные участники рынка и разработчики технологий сошлись на том, что будущее электроники за фотоникой — в частности, за кремниевой фотоникой, которая включает отдельные компоненты из других материалов сочетающихся с кремниевой технологией [4.82–4.84].

Действительно, существующие технологии передачи данных скоро достигнут верхнего предела по потребляемой мощности, плотности упаковки и весу. Фундаментальная идея состоит в том, что фотоны, по крайней мере частично, должны заменить электроны, и Si фотоника представляется хорошей платформой для этой трансформации.

Кремниевая фотоника соединяет в себе оптику и технологии КМОП (комплементарная метал-окисел-полупроводник, англ. CMOS), МЭМС (микро-электромеханические системы) и 3D компоновки чипов. Перспективность развития этой области подтверждают большие исследовательские программы, осуществленные во многих странах, и поддержанные как правительственными фондами, так и частными компаниями, а также значительная патентная база, созданная в результате этих программ.

4.2.2. Основные направления современных исследований и разработок и их приложения

В последние 10–15 лет быстрыми темпами развиваются технологии создания структур для нанофотонных устройств. Благодаря наличию подобных миниатюрных оптических компонентов становится возможным создание полностью оптических или фотонных схем, соперничающих по степени интеграции с современными электронными интегральными схемами. Потенциально, фотонные интегральные схемы могут обладать колоссальной информационной емкостью и высокой скоростью. Если принять во внимание, что волоконные световоды уже стали предпочтительной средой для передачи информации на большие расстояния, то можно предположить, что фотонам отведена важнейшая роль и в компьютерах будущего.

Благодаря развитию технологии набирают популярность устройства на основе кремниевых кристаллов — такие, как

световоды из связанных оптических резонаторов [4.82]. Кроме того, лазеры сверхмалых размеров, изготовленные на основе полупроводниковых и металлических материалов, могут выступать в роли легко интегрируемых в микросхему высокоэффективных источников света [4.84].

Плазмоника может совместить электронику и традиционную фотонику. Электрические характеристики полупроводников делают возможным создание настоящих наноэлементов для осуществления вычислений и хранения информации. Высокая прозрачность диэлектрических материалов (например, стекла) упрощает передачу данных на большие расстояния с высокими скоростями. Полупроводниковая электроника, однако, ограничена в скорости временем реакции RC-цепей. Физические ограничения в скорости, вызванные задержкой соединений, проявляются на частотах порядка 10 ГГц. Фотоника, в свою очередь, наталкивается на ограничения в размерах, порождаемых фундаментальными законами дифракции света. Плазмоника предлагает ровно то, чего не хватает электронике и фотонике: размеры электроники и скорость фотоники. Тем самым, плазмонные устройства становятся естественным звеном сопряжения между фотонными и электронными компонентами, способствуя синергии этих технологий.

Любые технологии изготовления нанофотонных устройств требуют высокоточных инструментов управления размером, формой и положением структур, высокой воспроизводимости, особо тщательного контроля чистоты материала и новых способов интеграции и сопряжения электроники и традиционной оптики.

Считается, что в электронике будущего для передачи данных внутри микросхемы будет применяться нанофотоника. Это позволит электронной промышленности продолжить движение к более мелким масштабам и более широкому диапазону частот. Для реализации этого подхода оптические элементы должны быть совместимы с кремнием — излюбленным материалом электроники Иначе говоря, необходима *кремниевая нанофотоника*. Устройства, позволяющие осуществить такой подход на практике, были предложены в концепции применения кремниевой фотоники для реализации оптических межсоединений в электронных схемах будущего, представленной компанией IBM в 2004 г.

До последнего времени считалось, что кремниевая нанофотоника сильно ограничена неспособностью кремния эффективно излучать и усиливать свет. Однако в недавней работе исследователей из Корнелльского университета [4.85] было показано, что усиления световых сигналов можно добиться, используя кремний как нелинейный оптический материал. Одним из ключевых доводов в пользу такой возможности служит высокий показатель преломления кремния, что позволяет создать наноразмерные световоды, удерживающие свет в чрезвычайно малом объеме. Благодаря этому, подобные устройства способны функционировать, потребляя очень малую мощность. Кроме того, такие наноразмерные световоды позволяют использовать волноводную дисперсию для сохранения фазового согласования нелинейных процессов, что радикально повышает эффективность устройства. Такой дисперсионный контроль был применен в работе [4.85] для достижения чрезвычайно высокой пропускной способности. Было продемонстрировано сверхмалое устройство, способное испускать свет в очень широком диапазоне частот. Испускаемое излучение подобно лазерному и может служить световым источником для использования в кремниевых микросхемах [4.86, 4.87].

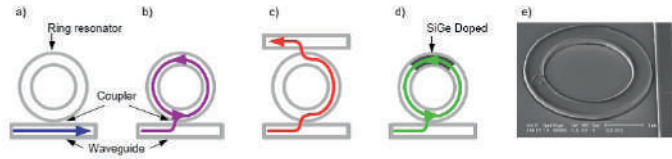
Развитие кремниевой нанофотоники происходит в основном благодаря значительным усилиям компьютерной промышленности, стремящейся внедрить эту технологию в вычислительные системы нового поколения.

Выше уже упоминалось о важности нанофотоники и плазмоники для задач обработки информации, интеграции в микросхемы фотонных источников, детекторов, световодов и обеспечения их соединений. Однако на пути реализации оптических межсоединений в микросхемах стоит множество трудностей. Для коммуникации на больших расстояниях были разработаны весьма изощренные оптические и оптоэлектронные технологии, однако требование высокой плотности межсоединений представляет проблему существенно иную природы. Для реализации плотно упакованных оптических соединений между микросхемами и внутри микросхем необходимы низкие показатели рассеивания мощности, малое время ожидания, малые физические размеры, возможность интеграции с кремниевыми электронными

компонентами для массового производства. Прежние приложения оптики в телекоммуникациях не порождали таких требований, поэтому имеющиеся технологии им не удовлетворяют. Эти требования к оптическим межсоединениям, а также ограничения электрических сигнальных цепей были детально проанализированы в работе [4.88]. Принципиальная возможность организации оптических межсоединений с электронными микросхемами исследовалась на протяжении многих лет, начиная с опубликованной в 1984 г. основополагающей статьи [4.89].

На ранних этапах исследовательской работы был сделан вывод о том, что использование оптических технологий для организации соединений внутри микросхем и между микросхемами может разрешить множество проблем, возникающих в современных электрических системах. Физические доводы в пользу применения оптических методов хорошо известны и указывают на разнообразные потенциальные выгоды — как количественного, так и качественного характера. Оптика в силах решить усугубляющиеся проблемы системной синхронизации, поскольку позволяет, к примеру, отдельным кремниевым микросхемам оставаться синхронизованными доменами даже с ростом размеров схем. Преимущества такой синхронизации проявляются как в задаче оптического распределения синхросигналов, так и в приложении к самим оптическим межсоединениям. Оптика способна снизить мощность, рассеиваемую кристаллом при распределении синхросигналов на соединениях внутри чипа в целом и на внешних соединениях. Кроме того, оптика может упростить решение целого ряда задач проектирования; в частности, оптическая схема не требует перепроектирования при увеличении скорости системы, оптические межсоединения обеспечивают электрическую изоляцию, а проблемы, связанные с отражением волн, согласованием импедансов и индуктивностью контактных выводов, по большей части исчезают.

Оптическая передача данных между микрочипами и внутри КМОП чипов находится на стадии интенсивных разработок многих компаний в сотрудничестве с университетами и национальными лабораториями. Рыночные продукты ожидаются, по оценкам экспертов, не ранее 2020 года [4.84].



a — Модулятор в положении вне резонанса;
b — Модулятор в резонансе;
c — Инжектор;
d — Детектор;
e — Изображение 3 мкм кольцевого резонатора, снятое электронным микроскопом.

Рисунок 4.12 — HP Corona: Схема ключевых элементов построения интерфейса между электроникой и фотоникой на основе кремниевого кольцевого резонатора, оптически связанного с волноводом.

Источник: [4.90]

Несколько устройств, анонсированных в публикациях и на конференциях, всё еще находятся в стадии доработки: Corona (HP) — см. Рисунок 4.12; Holey Optochip (IBM), Angstrom (MIT), Runnemed (Intel), Echelon (NVIDIA), X-Calibur (Sandia), DarpaUNIC (Sun/Oracle, Luxtera, Kotura).

Hewlett Packard (HP) Labs использует технологию кольцевых микрорезонаторов, оптически связанных с кремниевым волноводом. Небольшое изменение температуры кольца позволяет менять резонансную частоту меньше чем за наносекунду и, следовательно, модулировать оптический сигнал в волноводе. Такие же микрорезонаторы используются и для детекторов и микролазеров.

В недавней публикации IBM, MIT и U. Colorado [4.82] сообщается о гибридной электронно-фотонной системе, где на одном чипе интегрировано около 70 млн транзисторов и 850 фотонных компонент — включая функции логики, памяти и межсоединений. Устройство удалось реализовать в стандартном для микроэлектроники процессе изготовления микропроцессоров. Это успешная демонстрация объединения фотоники и электроники на одном чипе.

Устройство изготовлено с использованием коммерческой высокопроизводительной технологии 45 нм

комплементарной структуры метал-окисел-полупроводник структуры кремний-на-изоляторе (КНИ; англ. SOI). Оно имеет один чип, действующий как процессор, второй чип, действующий как память, и оптический двусторонний канал (дуплекс) с 20-метровым одномодовым оптоволокном, лазером и фотодетекторами.

Предполагается, что, благодаря нанофотонной компоненте, микропроцессор такого типа дает дополнительную степень свободы для конструирования крупномасштабных интегрированных цепей. Фотонная компонента здесь напрямую интегрирована с процессором и памятью, а значит, устройство может изготавливаться в одном процессе — с использованием всех преимуществ технологии многослойных электронных чипов. Система теплового контроля оптического резонатора с обратной связью обеспечивает надежную работу модулятора, таким образом решая одну из ключевых и давно стоящих проблем.

Оптическая часть работает на длине волны 1180 нм и использует SiGe (молярное содержание германия невелико) фотодетекторы. Кремний прозрачен на этой длине волны. Потери кремниевого волновода составляют примерно 4.3 дБ $см^{-1}$ (промышленный стандарт для потерь на 1550 нм — 4.6 дБ $см^{-1}$). Ресивер конвертирует фототок, производимый фотодетектором, в цифровой сигнал. Чувствительность ресивера к амплитуде оптической модуляции (индекс АОМ) составляет –5 дБм для уровня бит ошибки лучше, чем 10^{-12}.

Электрооптический трансмиттер состоит из электрооптического модулятора и его электронного драйвера. Модулятор представляет собой кремниевый кольцевой резонатор диаметром 10 мкм, принцип работы которого обсуждался выше в связке с оптическим волноводом.

4.2.3. Барьеры развития области и конкретных направлений — научные и технологические

Для оптических межсоединений высокой плотности в кремниевых интегральных схемах разработаны основные устройства и проведена лабораторная демонстрация ключевых элементов технологии. Для реализации оптических межсоединений на практике не требуется никаких рево-

люций в физике процесса (в то же время возможности для прорывов есть), однако необходимо провести существенную технологическую работу.

Любопытно, что основные перспективы и трудности предстоящего развития оптических межсоединений были ясно сформулированы еще в 2000 г. [4.89]:

- чтобы достичь соответствия практическим требованиям по продуктивности, допускам, управляющему напряжению и найти себе применение в следующих поколениях кремниевых микросхем, оптоэлектронные устройства должны пройти долгий путь в своем развитии;
- наиболее сложная задача касается интерфейсной части, то есть сопряжения оптических и электронных частей схем. Хотя каких-либо фундаментальных трудностей, препятствующих реализации таких схем в КМОП-процессе, в настоящий момент не отмечено, необходимо разработать схемы, которые избавлены от таких явлений, как взаимные помехи и восприимчивость к цифровому шуму, демонстрируют достаточно малое время отклика и низкий уровень рассеяния мощности, обладают стойкостью к отклонениям в технологическом процессе;
- технология интеграции оптоэлектроники с кремниевыми интегральными схемами (ИС) пока еще находится на ранних стадиях развития, хотя уже были продемонстрированы работающие прототипы. По всей видимости, в первое время для реализации оптических межсоединений в интегральных микросхемах будет использоваться, смешанная интеграция через выводы для пайки; это, помимо прочего, упрощает проектирование схем, поскольку оптоэлектроника подключается только на верхнем металлическом слое, что позволяет размещать электронные цепи в глубине кристалла совершенно свободно. В долгосрочной перспективе, будут, вероятно, исследоваться варианты монолитной интеграции, хотя сейчас такие подходы все еще находятся на этапе теоретического изучения;
- для оптики и механики таких оптических межсоединений внутри микрочипов понадобится разработать новые подходы — пока вопрос открыт;

- оптика, скорее всего, вызовет к жизни такие виды архитектурных решений, которые плохо подходили для систем с электрическими межсоединениями — например, архитектуры с большим количеством протяженных соединений, архитектуры с большим «отношением длины к ширине» схемы, архитектуры, требующие выполнения синхронных операций в больших доменах. Кроме того, у оптики хорошие перспективы в решении несколько более простой прикладной задачи распределения синхросигналов;
- вопрос стоимости оптических межсоединений, безусловно, относится к числу первостепенных. Почти все работы по оптическим межсоединениям представляют собой лабораторные исследования реализуемости технологии и ее возможностей. Наиболее честная оценка текущей ситуации сводится к тому, что любая попытка оценить окончательную стоимость в настоящий момент имеет совершенно умозрительный характер, а для снижения стоимости до приемлемых значений понадобятся как изрядная изобретательность, так и наличие больших потенциальных рынков сбыта.

4.2.4. Перспективы применения и коммерциализации

Всё более уверенно звучит мысль о том, что с ростом скоростей передачи данных оптические подходы уверенно распространяются из сектора протяженных линий связи на сектор более коротких соединений [4.82–4.84]. Оптические линии передачи данных проработаны вплоть до уровня микросхем, однако технологии оптических межсоединений на внутрисхемном уровне находятся по-прежнему в зачаточном состоянии [4.91]. Есть упоминания о том, что полностью оптические вычислительные системы с оптическими транзисторами вряд ли могут состязаться со схемами на электронных транзисторах. Авторы этих работ предлагают комбинации электронных транзисторов с оптическими соединениями, о чем будет говориться ниже.

Действительно, с перспективами применения оптической логики связаны значительные трудности. Транзисторы

будущего будут иметь емкости порядка десятков аттофарад, и, следовательно, при напряжении ~1 В будут тратить на операцию энергию порядка десятков аттоджоулей. Такие энергии соответствуют всего-навсего нескольким сотням фотонов, а значит, нам потребуются оптические устройства, эффективно работающие при таких уровнях энергии. Этого можно добиться, используя нанорезонаторы или крошечную нанометаллическую антенну либо световод. Можно было бы также использовать активный полупроводниковый элемент размером примерно 100 нм и меньше или даже квантовую точку. Управляемое изготовление и использование квантовых точек для оптических транзисторов — идея пока умозрительная, однако следует отметить, что предполагаемый размер затвора будущих транзисторов составит примерно 10 нм, так что, вполне вероятно, потребуется использовать подобные квантовые структуры в производстве.

Уходя в еще более гипотетические области, можно представить оптические транзисторы, оперирующие отдельными фотонами. Возможные схемы таких операций были продемонстрированы группой [4.92]. Подобные устройства допускают выполнение настоящих квантовых операций, включая квантовую логику и квантовую обработку информации. Техническая реализация системы, которая уверенно справлялась бы с практическими сложностями, связанными с когерентностью и обратимостью, остается серьезной проблемой.

В работе [4.93] авторы предлагают концепцию соединения фотонными сигнальными линиями, где используются полимерные световоды (геометрия может быть любой в 3-х измерениях). В эксперименте, доказывающем жизнеспособность концепции, продемонстрировано изготовление межсоединений с помощью одномодовых фотонных волокон (photonic wire bond — PWB) методом прямой двухфотонной литографии. Прототипы первого поколения позволяли выполнить эффективное широкополосное соединение со средними вносимыми потерями всего 1,6 дБ и могли поддерживать многотерабитную скорость мультиплексной передачи сигналов с распределением по длинам волн.

Лидеры в области плазмонных нановолноводов [4.74] оптимистично оценивают возможность использование наноструктур с размерами меньше дифракционного предела,

способных поддерживать распространение поверхностных плазмонов. Были продемонстрированы уникальные свойства таких структур, позволяющие эффективно концентрировать свет и манипулировать им на масштабах существенно меньших длины волны света. Эти структуры способны также передавать световую энергию наноразмерным же оптическим и электронным устройствам, квантовым точкам и даже отдельным молекулам. Возможность точной субволновой локализации передаваемых плазмонных сигналов делает такие структуры особенно полезными для будущего проектирования и разработки эффективных нанооптических устройств и схем высокой степени интеграции для обработки сигналов. [4.74]. Однако применение плазмонных волноводов, скорее всего, потребует активных устройств с возможностью компенсации потерь.

Профессор Марк Стокман возлагает надежды на смешанный подход, в котором оптические межсоединения рассматриваются как набор компонентов, необходимых для того, чтобы снять сигнал с выхода одного транзистора и передать на вход другого с использованием оптического источника, световода и детектора, сравнимых по размеру с электронными транзисторами. Стокман и Ли теоретически рассмотрели спазер, который возбуждается электрическим импульсом, подаваемым по нанопроводнику с баллистической квантовой проводимостью [4.94]. Было показано, что в квантовом режиме принципиально возможна работа спазера с ядром из типичных плазмонных металлов, таких как серебро или золото. При использовании нанопроводника с баллистической мультиквантовой или классической проводимостью производительность спазера повышается по сравнению с существенно квантовым пределом. Спазер с электрической накачкой является многообещающим устройством в качестве оптического источника, наноусилителя и цифрового логического устройства для оптоэлектронной обработки информации со скоростями в диапазоне от 100 ГГц до 100 ТГц.

Стокман с соавторами сообщает о первой демонстрации широкополосных настраиваемых одномодовых плазмонных нанолазеров (спазеров), излучающих во всем видимом спектре [4.95]. Основой для них служит МОП-пластина, состоящая из полупроводниковых наностержней, которые рас-

положены на эпитаксиальной серебряной пленке покрытой оксидом алюминия Al_2O_3. В частности, лазерная генерация во всем диапазоне длин волн происходит в субдифракционных плазмонных резонаторах за счет оригинального механизма обратной связи, основанного на присущей спазерам слабой зависимости от размера плазмонной структуры. Более того, порог непрерывной лазерной генерации удалось снизить до сверхмалых значений для всех трех основных цветов, явно продемонстрировав возможность «беспороговой» генерации для голубого плазмонного нанолазера.

Стокман с соавторами [4.96] также показали, что адиабатическая фокусировка поверхностных плазмонов на коническом наноразмерном острие с диодом Шоттки на конце позволяет преобразовывать плазмоны в горячие электроны с эффективностью до 30%. При такой высокой эффективности конверсии горячие электроны можно использовать в качестве основы нового метода наноскопии на установке для атомно-силовой микроскопии. Такая наноскопия горячими электронами сохраняет химическую чувствительность сканируемой поверхности и имеет пространственное разрешение выше 50 нм с возможностью дальнейшего улучшения.

4.2.5. Оценки текущего и потенциального спроса для практических применений

Несмотря на значительное количество достижений, рынок кремниевой фотоники сейчас относительно невелик и составляет около 50 млн долл. На данный момент, лишь немногие компании поставляют на открытом рынке реальные системы [4.84].

Интегрированная фотоника на настоящий момент опирается на три основных технологии: кремниевая фотоника, InP фотоника (в частности, InP лазеры используются и в кремниевых технологиях) и диэлектрические волноводы, например, нитрид кремния, Si_3N_4. Последний пока больше применяются в телекоме для изготовления делителей и решеток волноводов и позволяет использовать излучение видимого и ближнего инфракрасного диапазонов.

Несмотря на все еще небольшой рынок кремниевой фотоники, интерес к нему по-прежнему огромный. Тому

свидетельствуют продолжающиеся поглощения малых компаний большими, накопление интеллектуальной собственности, активные исследования. Основу рынка пока составляет передача данных для высокопроизводительных компьютеров. Ожидаемый прорыв фотонных технологий на рынок «назначен» на 2022–2024 годы.

Ожидаемые преимущества кремниевой фотоники:

- использование полупроводниковых материалов в качестве среды для оптических сигналов, что позволяет достичь гораздо больших скоростей передачи цифровой информации по сравнению с традиционными электронными устройствами;
- использование преимуществ хорошо развитых полупроводниковых технологий;
- низкое потребление энергии в сравнении с медными соединениями;
- надежность, необходимая для центров данных, в которых время жизни серверов составляет сейчас около двух лет;
- выгода может быть также достигнута за счет интегрирования, низкой цены изготовления и потенциально высокой плотности компоновки.

На ближайшие 3–5 лет ожидается проникновение кремниевых фотонных чипов, возможности которых намного превосходят возможности медных соединителей, в системы высокоскоростной передачи данных в дата-центрах и высокопроизводительных компьютерах.

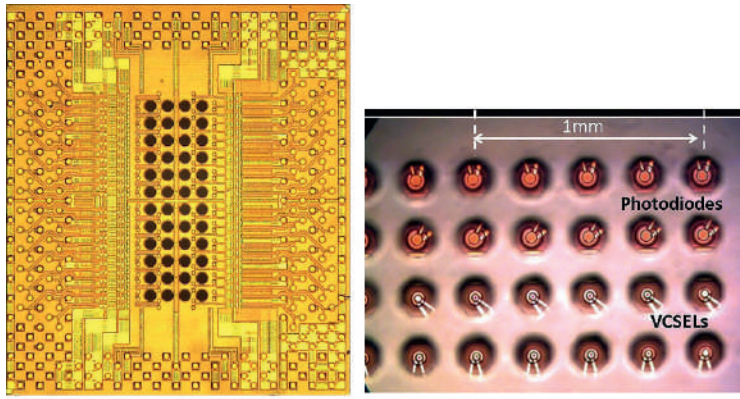
По мере развития кремниевой фотоники и усложнения чипов ожидается появление новых разработок в части технологии изготовления межсоединений внутри многоядерных процессоров, что позволит улучшить доступ к сверхоперативной памяти и шинам процессора.

По оценкам экспертов, объем рынка кремниевой нанофотоники будет расти со средним годовым темпом 35% и составит около 700 млн. долл. в 2024 году.

4.2.6. Ключевые проекты в мировых компаниях-лидерах

Компания IBM, по доступной на текущий момент информации, является одним из ключевых игроков [4.97, 4.98]. Работу над некоторыми компонентами она ведет в сотрудничестве с AGC (Asahi Glass) и Furucawa Electric. В этот процесс вовлечены следующие подразделения IBM: IBM Watson (Нью-Йорк, США), IBM Research (Токио), IBM Bromont-C2MI (Канада).

Для оценки сроков коммерциализации этой новой технологии, можно вспомнить ключевые события и достижения IBM в области разработки оптических межсоединений. Первый серьезный проект, финансированный агентством DARPA, стартовал в 2003 г., и уже через два года был заявлен прототип устройства с оптическими межсоединениями. Сверхкомпактный оптический буфер на основе кремниевой микросхемы с каскадом микрокольцевых осцилляторов был создан в 2007 г. Затем были реализованы оптические каналы связи, маломощные приемопередающие устройства и резонаторы. В 2010 г. был создан опытный образец, а в 2012 г. выпущен оптический чип. Как было заявлено: «Микросхема Holey Optochip впервые в истории человечества передала с помощью световых сигналов триллион битов информации в течение одной секунды» (Рисунок 4.13). Компания IBM сумела преодолеть основные препятствия на пути передачи технологий полупроводниковой нанофотоники в коммерческое производство. Добавление нескольких обрабатывающих модулей к высокопроизводительной производственной линии, выпускающей КМОП-микросхемы по технологическому процессу 90 нм, позволило расположить на полупроводниковом чипе непосредственно рядом с электрическими цепями разнообразные нанофотонные компоненты, такие как спектральные уплотнители каналов (оптические мультиплексоры с разделением по длине волны — wavelength division multiplexer, WDM), модуляторы и детекторы. В конечном итоге это делает возможным производство по устоявшейся полупроводниковой технологии оптических приемопередатчиков на одном кристалле, что значительно снизит затраты по сравнению с традиционными подходами. Разработанная компанией IBM технология полупроводниковой



Слева вид сверху, размер 5.2x5.8 мм;
Справа вид сзади с лазерами и фотоприемниками, которые видны через отверстия в подложке.

Рисунок 4.13 — Микрофотография IBM Holey Optochip

Источник: [4.151]

нанофотоники удешевляет оптические каналы связи, сфера использования которых с 2003 г. и вплоть до настоящего времени последовательно расширяется — от соединений между вычислительными модулями и стойками к соединению микросхем с помощью микроразмерных одноволоконных оптических приемопередатчиков сверхнизкой мощности.

В настоящее время наблюдается активность по получению патентов и публикации материалов на тему полупроводниковой нанофотоники. Согласно опубликованной на сайте IBM информации, поставлена задача преодолеть в полупроводниковых технологиях порог 7 нм и, возможно, отойти от использования кремния, который на данный момент повсеместно применяется в качестве материала для микросхем, но при этом сдерживает появление следующего поколения компьютеров и наступление «новой вычислительной эры». Для финансирования исследований и ранних этапов промышленных разработок в этой области в IBM принят пятилетний инвестиционный план с бюджетом 3 млрд долл.

Hewlett Packard разрабатывает компьютерный чип, состоящий из 256 оптически соединенных микропроцессоров, ко-

торые будут обмениваться данными со скоростью 20 Тбайт/с. Скорость обмена с памятью ожидается на уровне 10 Тбайт/с. Утверждается, что 5 таких чипов вместе будут достигать скорости современных суперкомпьютеров. В 2015 г. HP оценило перспективы выпуска в несколько лет [4.99]. Многоядерные процессоры будут обмениваться данными с основной памятью (объемом 320 Тбайт) с помощью кремниевых оптических межсоединений со скоростью 1–2 Тбайт/с. Основное ограничение скорости связано с динамической памятью с произвольным доступом (dynamic random access memory DRAM) и флэш-драйв памятью. Для супермашины HP вся память должна быть доступна для центрального процессора в любой момент времени (memristor) [4.100].

Micron Technology (Boise, ID), MIT, U. of Colorado, and UC Berkeley сообщили о разработке монолитного КМОП протокола, объединяющего фотонные и электронные компоненты для передачи данных на удаленные устройства памяти, который включает внешний лазер, оптический соединитель (5 Гбит/с на 5 м), поликремниевый резонансный детектор и интегрированный SiGe фотодетектор.

«Интел» видит перспективу в разработке интегрированных чипов большого объема с использованием кремниевой фотоники. Это позволит радикально изменить возможности использования фотоники для существующих у «Интел» систем и сетей. Само наличие фотоники устранит ограничения на ширину полосы и расстояние передачи информации, позволяя рассчитывать на определенную гибкость в архитектуре и более эффективную обработку данных. Разработчики ожидают также разнообразные применения за пределами цифровых коммуникационных систем — такие как, например, оптическое устранение ошибок в передаче данных с высокой скоростью, расширение беспроводной сети путем транспортировки аналогового радио-частотного сигнала, дешевые лазеры для биомедицины.

ADVA Optical Networking в марте 2016 объявила о выпуске нового модуля MicroMux™ как дополнения к платформе FSP 3000 CloudConnect™. Новый модуль обеспечивает беспрецедентные параметры порта для межсоединений датацентра при той же мощности, а также пространственной или спектральной эффективности. Теперь один адаптер (QSFP28)

может конвертировать 100 GbE (Gigabit Ethernet) порт в 10 x 10 – GbE. Раньше использование 100 Гбит оптического транспорта для передачи параллельных 10 Гбит потоков данных снижало эффективность статистического мультиплексирования в пакетных сетях [4.101].

Сложность в разработке чипсета для поддержки 100 Гбит Ethernet заключается в необходимости обеспечения высокой производительности при равномерной загрузке интерфейса вне зависимости от параметров входящего трафика и отсутствии перестановок пакетов внутри одного IP/MPLS потока — последнее требование делает распараллеливание одного полнодуплексного 100 Гбит интерфейса между несколькими сетевыми процессорами технически сложным.

Компания Mellanox Technologies аннонсировала преодоление важнейшего этапа на пути к высокоскоростной передаче данных (High Data Rate, HDR), а именно 200 Gb/s InfiniBand и Ethernet сетей. Компания продемонстрировала 50 Гбит/с оптические модуляторы и детекторы, которые будут ключевыми элементами 200 Гбит/с и 400 Гбит/с LinkX кабелей и трансиверов. Для увеличения скорости преобразования электронов в фотоны ширина волновода должна быть как можно меньше. Достижение компании в том, что архитектура устройства позволяет в полной мере использовать преимущества полупроводниковых технологий (в описываемом случае — фотолитографии) для очень точного изготовления волновода в секции модулятора. То же самое относится и к секции детектора.

Компания NXP (бывшая freescale) делает акцент на исследованиях и разработках новых технологических процессов для изготовления, как формулирует компания, «устройств самых малых размеров, наиболее оптимизированных и высокопроизводительных, чтобы ускорить выход на рынок своих партнеров и заказчиков».

Продвижение разработок в области оптических соединений и оптоэлектронных компонентов для наноэлектроники ведется в основном большими компаниями, такими как HP, INTEL, IBM и сравнимыми с ними. Университетская наука концентрируется главным образом на отдельных компонентах нанофотоники и активно кооперируется с компаниями и национальными лабораториями. Данная область требует

наиболее передовой технологии и значительных затрат, кооперация здесь неизбежна и число публикаций нарастает год от года. Процент российских публикаций по оптической или фотонной наноэлектронике крайне низок. Нет сомнений, что в России существует полупроводниковая промышленность, разрабатываются современные источники и приемники излучения, однако академическая наука и университеты практически не имеют связи с промышленностью, хотя они теоретически могут быть вовлечены по крайней мере в будущие разработки. Как показывает опыт IBM, для эффективного вхождения в область требуется примерно 10 лет. Пример развития кремниевой электроники показывает также, что затраты окупаются не только конечным продуктом, но и в виде сопутствующих новых решений.

Исследования в области оптических межсоединений способны значительно увеличить типичные скорости потоков информации за счет использования для передачи данных световых импульсов вместо движения электронов по проводникам. В связи с этим идет интенсивный поиск таких способов передачи оптических сигналов, которые были бы совместимы с технологиями экономичного массового производства микросхем для широкого применения.

Согласно данным поисковой системы Web of Science по теме оптических межсоединений (ключевые слова Optical Interconnects), интерес к этой теме очень высок и продолжает расти. Хотя на долю российских исследователей приходится менее0,5% от общего числа публикаций, возможно именно по этой причине тематика заслуживает существенно большего внимания. Исследования в мировой науке проводятся очень интенсивно. Они показали, в частности, как высока потребность в новых нестандартных решениях.

Об одной такой попытке нестандартного подхода к созданию нового поколения компьютеров совсем недавно заявила компания Hewlett Packard [4.102], о чем было кратко рассказано выше.

Эта проблема международная, и ведущие игроки в мире объединяются при решении задач, связанных с вовлечением фотоники в компьютерные технологии. Существенный рост рынка ожидается после 2024–2025 гг.

4.3. Оптическое стекло и стеклокерамика

4.3.1. Введение

В конце XX века оптические технологии начали конкурировать с традиционными, а в XXI веке стали их вытеснять. Следует отметить, что переход на оптическую (фотонную) идеологию был бы невозможен без разработки новых оптических материалов, поскольку именно они лежат в основе всех прорывных направлений [4.103].

В этом разделе дано краткое описание основных направлений и перспектив научного и технологического развития оптического стекла и стеклокерамики для задач фотоники.

Развитие элементной базы оптических, телекоммуникационных и лазерных систем невозможно без оптических материалов нового поколения. Поэтому их разработка является важной актуальной и стратегической задачей в оптике, фотонике, оптическом приборостроении и оптическом материаловедении. В свою очередь, новые оптические среды должны строиться на основе новых подходов, в частности, на использовании наноматериалов и нанотехнологий для их получения. Такие оптические среды будут обладать уникальными свойствами, которых нельзя достичь на основе традиционных подходов. Эти уникальные свойства наноматериалов будут определять рекордные эксплуатационные характеристики оптических элементов, приборов и устройств. Соответственно, разработка современных стекол и стеклокерамик должна строится на идеологии наноструктурированных материалов.

Актуальность новых стекол и стеклокерамик обуславливается необходимостью решения таких остро стоящих сегодня глобальных технологических проблем фотоники, как:

а) разработка материалов, способствующих миниатюризации оптических и фотонных элементов, приборов и систем с целью уменьшения их массогабаритных характеристик, энергопотребления и управляющих воздействий;

б) расширение функционального диапазона работы стекол и стеклокерамик и создание на их основе элементов и устройств фотоники. Для этого на смену традиционным оптическим материалам должны прийти наноматериалы,

обладающие уникальными квантово-размерными характеристиками, и метаматериалы, обладающие физическими свойствами, которые не встречаются в природе (например, отрицательной диэлектрической и магнитной проницаемостью). В таких необычных средах стирается грань между понятием «материал» и «устройство». Второй пример, использование лазерных импульсов фемто- и аттосекундной длительности позволит решать осуществлять сверхплотную запись информации (до 10 Тбит/см^2) и сверхскоростную передачу информации по волоконным линиям связи. (до 10 Петабит/сек);

в) разработка материалов, позволяющих проводить гибридную и монолитную интеграцию оптических и фотонных элементов, приборов и систем на единой подложке;

г) разработка материалов со сверхбыстрым (фемтосекундным) переключением для создания полностью оптических устройств управления сигналом;

д) разработка материалов с низким уровнем энергии управляющих сигналов (фемтоДж),

е) разработка сверхчистых стекол с рекордно низкими потерями и специальным ходом дисперсии для волоконных линий связи и фотолитографии;

ж) разработка стекол и стеклокерамик, в том числе активированных, для получения крупногабаритных оптических элементов высокого оптического качества (лазерный термоядерный синтез, фотолитография, астрономическая оптика);

з) разработка гибридных материалов типа «стекло-полимер» для сверхлегких оптических элементов (авионика, космос);

и) разработка сверхпрочных стекол и стеклокерамик (авионика, глубоководные и космические аппараты);

к) разработка сверхтонких крупногабаритных стеклянных панелей (дисплеи, солнечные батареи);

л) разработка стекол с низкими температурами формования и молирования и особым ходом дисперсии (микрооптика);

м) разработка стекол и стеклокерамик, работающих в среднем и дальнем ИК спектральном диапазоне;

н) разработка стекол и стеклокерамик, работающих в Терагерцовом диапазоне.

Разработка сверхчистых стекол с рекордно низкими потерями и специальным ходом дисперсии для волоконных линий связи

Используемое сегодня в оптических линиях связи волокно на основе силикатного стекла, по оптическим потерям вышло на свой предел ~0.2 дБ/км на длине волны 1.55 мкм (рекорд 0.154 дБ/км, компания — Sumitomo Electric Industries Ltd, 2002 г.), и дальнейшее уменьшение потерь требует кардинального изменения идеологии как в разработке самого материала, так и в разработке конструкции оптического волокна. Предложено два подхода.

В первом предлагается перейти от оксидной силикатной матрицы стекла к бескислородной — фторидной. Такой переход дает двойной выигрыш:

- уменьшение потерь до 0.1–0.01 дБ/км;
- расширение спектрального рабочего диапазона оптических линий связи, включая средний ИК (до 3 мкм), что ведет к дальнейшему увеличению числа спектральных каналов и, соответственно, объему передаваемой информации.

Следует отметить, что получение сверхчистых фторидных волокон с рекордно малыми потерями в условиях гравитации крайне затруднено, поэтому американские компании

Таблица 4.4 — Сравнительные характеристики коммерческого волокна с микроструктурированным (фотонно-кристаллическим) волокном

Характеристики	Обычное волокно	Фотонно-кристаллическое волокно
Числовая апертура	0.06	0.6 достигнуто >0.9 – теоретически
Диаметр волокна для одиночного режима, мкм	7, 1540 нм	> 40, λ=300–2000 нм
Площадь ядра, мкм²	50	от 3 до 1000
Нелинейные эффекты	много	отсутствуют
Оптические потери, дБ/км	0.2	0.0005

Physical Optics Corporation, Air Force Research Labs и NASA Marshall Space Flight Center в 2014 г. начали эксперименты по вытяжке волокна в условиях невесомости на летательных аппаратах в свободном падении [4.104]. Далее эти эксперименты они планируют проводить на Международной Космической Станции.

Второй подход заключается в создании принципиально новой конструкции — микроструктурированного волокна. Это даст возможность приблизиться к рекордно низким потерям (теоретический предел 0.0005 дБ/км). Кроме того, такая конструкция позволяет реализовывать одномодовый режим работы волокна большого диаметра (более 40 мкм), что может уменьшить плотность мощности передаваемого излучения и избежать нежелательных нелинейных эффектов.

Разработка гибридных материалов типа «стекло-полимер», «стекло-люминофор», «стекло-графен»

Гибридные органо-неорганические композиты и нанокомпозиты — это гетерофазные материалы, созданные из органических и неорганических компонент, формирующих определенную кристаллическую или аморфную структуру.

Сегодня одним из важных направлений в оптике и фотонике является создание облегченных элементов и устройств. Рассмотрим гибридный материал «стекло-полимер». Стекло, несмотря на свои достоинства (высокий показатель преломления, $n = 1.6–2.3$, однородность, механическую, термическую и оптическую прочность и химическую устойчивость) имеет высокую плотность (4–8 г/см^3) и соответственно вес, что сдерживает его применение в авионике и космосе. В свою очередь, полимеры, обладая низкой плотностью (1.2 г/см^3), имеют малую механическую, термическую и оптическую прочность и низкую химическую устойчивость, что также ограничивает их применение в указанных отраслях. Поэтому, на сегодняшний день встает важная задача создания принципиально новых оптических материалов, которые бы, с одной стороны, имели низкую плотность, а с другой — высокие эксплуатационные характеристики — высокую механическую, термическую и оптическую прочность и высокую химическую устойчивость. Ведутся исследования по разработке

гибридных материалов, которые сочетают в себе достоинства и стекол, и полимеров.

Использование гибридного материала, который представляет собой композит из стекла и порошка люминофоров позволит разрабатывать более стабильные, эффективные и мощные белые светодиоды. Этого возможно за счет того, что теплопроводность стекла выше чем у силиконов и может достигать 1 Вт/(м·К). В таком композите можно значительно снизить рассеяние за счет выравнивания показателей преломления стекла и порошка. Также эти материалы обладают высокой термической и оптической стойкостью. Первые результаты, полученные в Университете ИТМО, показывают, что за счет более высокой теплопроводности при одинаковых температурах интенсивность свечения у композитов «люминофор в стекле» выше чем у традиционных «люминофор в полимере».

Таблица 4.5 — Преимущества и недостатки стекол, полимеров и гибридов

	Стекла	Органика	Гибриды
Преимущества	Высокий показатель преломления Высокая однородность 10^{-6} Высокая механическая, термическая прочность и химическая устойчивость	Низкая плотность: 1.2 г/см^3 Низкая стоимость	Показатель преломления, n = 1.6–1.8 Плотность: 1.6 г/см^3 Высокая механическая прочность и химическая устойчивость
Недостатки	Высокая плотность: 4–8 г/см^3 Высокая кристаллизационная способность Высокая токсичность Высокая стоимость	Низкий показатель преломления, Низкая однородность Низкая механическая, термическая прочность и химическая устойчивость	Пока не определены

Разработка полифункциональных стекол и стеклокерамик

Одним из актуальных направлений фотоники является разработка материалов, позволяющих реализовывать миниатюризацию и интеграцию оптических и фотонных элементов, приборов и систем. Эта задача может быть решена за счет создания принципиально новых оптических сред — полифункциональных материалов (кристаллов, стекол, стеклокерамик). Оптические полифункциональные материалы одновременно объединяют в себе характеристики нескольких оптических сред и проводят разные функциональные операции со светом (генерацию, усиление, модуляцию, отклонение световых потоков, передачу, запись, хранение и обработку информационных потоков и т. д.). При этом остальные характеристики оптических полифункциональных материалов сравнимы с характеристиками монофункциональных аналогов.

Несмотря на большие перспективы использования полифункциональных материалов в мини- и микрооптике, интегральной и волоконной оптике, номенклатура таких материалов очень мала, и их разработка, в России, как и за рубежом, находится на стадии поисковых исследований. На сегодняшний день можно выделить несколько оптических материалов, которые можно отнести к разряду полифункциональных:

- кристалл ниобата лития, активированный редкоземельными ионами (этот кристалл обладает высокими нелинейно-оптическими и электро-оптическими характеристиками; на его основе возможно создание волноводных структур, а также оптических усилителей и лазеров);
- халькогенидное стекло, активированное редкоземельными ионами (в этом стекле возможна голографическая запись брэгговских решеток за счет эффекта фоторефракции, а также создание активированных волокон для волоконных лазеров).

Этими двумя классами и ограничивается современная номенклатура полифункциональных оптических материалов. В каждом из них используется традиционный подход,

состоящий в легировании известного готового материала активными добавками, которые придают ему дополнительные качества, т. е. делают его полифункциональным. Основной недостаток такого подхода в том, что полифункциональность снижает технические и эксплуатационные характеристики исходного материала. Этот недостаток может быть преодолен при использовании наноструктурированного материала в силу того, что присутствующие в нем наноразмерные образования могут обеспечить значительную модуляцию оптических свойств матрицы и, тем самым, обеспечить создание материала с характеристиками близкими или даже превосходящими таковые коммерческих монофункциональных аналогов.

Поэтому, на сегодняшний день именно разработка новых полифункциональных оптических наноструктурированных материалов представляет собой чрезвычайно актуальную задачу в оптическом материаловедении. Идея создания оптических полифункциональных материалов, на основе легированных силикатных, фосфатных и боратных стекол и наностеклокерамик выдвинута впервые в университете ИТМО в 2008 г. [4.105, 4.106]. Далее это подход стал активно развиваться за рубежом (OptiGrate — США, CREOL-University of Central Florida — США).

В частности, в университете ИТМО разработан новый полифункциональный материал — фото-термо-рефрактивное стекло, активированное ионами редкоземельных элементов [4.105]. В этом стекле под действием лазерного облучения и последующей термообработки вырастают нанокристаллы фторида натрия. Разность в показателях преломления нанокристаллической фазы и матрицы стекла ($\Delta n = 0.001$) используется для записи объемных фазовых голограмм — брэгговских решеток. Это стекло используется для создания широкого класса голографических дифракционных элементов для лазерных систем:

- сверх-узкополосных спектральных фильтров с шириной полосы менее 0.1 нм;
- фильтров, повышающих спектральную яркость полупроводниковых лазеров, уменьшающих ширину полосы излучения (до 5 пикометров) и уменьшающих температурный дрейф длины волны (0.01 нм/°C);

- сумматоров и комбайнеров лазерных пучков;
- спектральных мультиплексоров;
- чирпированных брэгговских решеток для компрессии световых импульсов.

Новое активированное фото-термо-рефрактивное стекло также можно использовать, как лазерную среду для создания оптических усилителей (при использовании идеологии монолитной интеграции оптических элементов) и лазеров с распределенной обратной связью [4.107, 4.108].

Можно предположить, что прогресс в создании миниатюрных фотонных элементов и устройств будет связан именно с созданием соответствующих полифункциональных оптических материалов.

Разработка сверхтонких крупногабаритных стеклянных панелей

Одним из актуальных направлений в фотонике является получение ультратонких сверхпрочных панелей для дисплеев, защитных окон солнечных батарей и смартфонов.

Эти защитные панели должны быть очень тонкими, толщиной 50–200 мкм и, одновременно, очень прочными и гибкими. Кроме того, предъявляются следующие особые требования: высокая механическая и термическая стойкость, высокая абразиво- и химическая устойчивость, малый вес. Для этих задач компания Corning Inc. разработала специальный состав силикатного стекла, а также уникальную технологию вытяжки листового стекла толщиной 50–200 мкм и шириной листа до 4 метров. Далее это стекло подвергается дополнительному упрочнению за счет ионного обмена — процесса, при котором стекло помещается в ванну с расплавом соли KNO_3, в результате чего происходит обмен ионов натрия в стекле на ионы калия из расплава. В результате такой операции, за счет сжимающих напряжений в поверхностном слое стекла прочность исходного стекла повышается в несколько раз. Сегодня такие стекла выпускаются компаниями Corning Inc (GorillaGlass) и Asahi Glass (Dragontrail).

Сейчас перед разработчиками и производителями ультратонких и сверхпрочных оптических стекол стоит более амбициозная задача — получение стеклянных панелей толщиной

10–20 мкм. Эта задача ориентирована на создание еще более гибких дисплеев, в том числе, дисплеев и солнечных батарей, которые могут оперативно сворачиваться и разворачиваться.

В связи с ограниченностью объема публикации описание других направлений исследований внутри данной тематики, перечисленных во введении к этому разделу, не приводится.

4.3.2. Научные и технологические барьеры развития области

Прогресс в области разработки новых стекол и стеклокерамик для фотоники существенно замедляется из-за:

- ограниченного числа производителей сверхчистых химических реактивов, используемых для синтеза стекол и, соответственно, высокой цены этих химреактивов;
- ограниченного числа предприятий по производству высокотемпературных печей, включая вакуумные высокотемпературные установки, а также установок для синтеза в специальной атмосфере (окислительной, восстановительной, инертной) и, соответственно, высокая цена на эту продукцию;
- сосредоточения Китаем к настоящему времени 97% мирового производства редкоземельных элементов, квот на их экспорт и ежегодного повышения пошлин на вывоз ценных для своей экономики сырьевых ресурсов. Такая монополия опасна, поскольку редкие земли необходимы многим современным производствам, в том числе, ориентированным на рынок электроники и фотоники.

4.3.3. Востребованность технологии и рыночные перспективы

Из всех перечисленных основных направлений исследований стекол и стеклокерамик наиболее развитыми и уже внедряемыми в промышленное производство в последние 2–3 года являются следующие технологии:

- получение сверхтонких (до 80–150 мкм) крупногабаритных (с шириной листа до 4 метров) стеклянных панелей для дисплеев, защитных окон солнечных батарей

и смартфонов из стекла Willow-Glass. Эта технология разработана компанией Corning Inc. в 2010 г. В 2015 г. немецкая компания Schott заявила о создании прочного и гибкого стекла толщиной уже 25 микрометров, которое в будущем может быть использовано во всевозможных гаджетах с гибкой формой. Прочность изделия достигается путем применения технологии ионного обмена, аналогичной той, что используется для создания стекла GorillaGlass. Продукт от Schott поддается сгибанию до радиуса в девять миллиметров, не проявляя при этом признаков усталости. Производитель уже не просто начал производить сверхтонкое стекло, но и изготавливает его лентами, в дальнейшем храня в рулонах. Сейчас инженеры компании трудятся над созданием стекла толщиной всего лишь 10 микрометров. Следует ожидать промышленного получения таких сверхтонких стеклянных панелей в 2017–2018гг;

- разработка и промышленное освоение полифункциональных стекол. Сотрудники университета ИТМО и американской компании OptiGrate разработали в 2010–2015 гг. полифункциональное фото-термо-рефрактивное стекло, легированное редкоземельными ионами. На этом стекле им удалось записать брэгговские решетки, получить генерацию и усиление. В 2017–2018 гг. планируется на этом стекле создать лазеры с распределенной обратной связью и ожидается промышленное внедрение этой технологии в компании IPG (США) и ОАО «ИРЭ-Полюс»;
- разработка микроструктурированных (фотонно-кристаллических) волокон с рекордно низкими потерями. Полупромышленные технологии были продемонстрированы многими компаниями (Corning, Silitec Fibers и т. д) 5 лет назад. В ближайшие 2–3 года планируется промышленный выпуск этих волокон, в том числе, активированных редкоземельными ионами.

Более далекий прогноз можно сделать для следующих технологий:

- вытяжка оптических волокон с высокой однородностью и рекордно малыми потерями из фторидных стекол пока возможна лишь в невесомости. Компания Physical Optics

Corporation совместно с Air Force Research Labs и NASA Marshall Space Flight Center планируют в 2017–2018 гг. провести первые эксперименты по вытяжке оптического волокна в космосе на Международной Космической Станции. К 2020–2025 гг. планируется полупромышленное освоение этой технологии;

- разработка стекол и стеклокерамик, работающих в терагерцовом диапазоне. Это направление крайне актуально для решения задач безопасности и охраны. В настоящее время появляются лишь первые фундаментальные работы по разработке таких материалов. В основе их лежат новые принципы взаимодействия и переноса терагерцового излучения в веществе. Можно ожидать появление первых опытных образцов к 2020 г., а к 2025 — промышленное освоение этих технологий.

Рынок оптических стекол и стеклокерамики в мире и в России в целостном виде нигде в аналитике и обзорах не отражен. Существует аналитика по отдельным видам оптических материалов, например, по бесцветным оптическим стеклам, по кварцевому стеклу, по дисплейному стеклу, по лазерным стеклам, по оптическому волокну и т. д. Следует отметить, что рынок оптических стекол и стеклокерамики и в мире, и в России очень большой. И он, прежде всего, определяется спросом по следующим ключевым направлениям фотоники:

- оптическое волокно;
- светодиоды;
- лазеры;
- дисплеи;
- сенсоры;
- оптические компоненты приема, обработки, хранения и передачи информации.

Ниже приведены примеры сегментов рынка по оптическим стеклам и стеклокерамикам:

Рынок волоконных световодов

Сегодня рынок волоконных световодов демонстрирует устойчивый рост [4.109]. Если рассматривать его по ключевым секторам, то можно отметить следующую динамику:

- специальные волоконные световоды — среднегодовой прирост 38.9%;
- волоконно-оптические датчики — среднегодовой прирост 17.5%;
- волоконные лазеры и усилители — среднегодовой прирост 7%.

В 2015 г. суммарный рынок по трем перечисленным позициям составил почти 160 млрд. руб., а к 2023 г. должен составить более 5000 млрд. руб.

Рынок светодиодной техники

В светодиодную технику входят следующие основные компоненты: светоизлучающие кристаллы LED и люминофоры для преобразования излучения, в том числе люминофоры в стекле [4.110, 4.111]. Прогноз по развитию мирового рынка освещения, сделанный компанией SEMI, предсказывает двукратное увеличение рынка за период 2014–2020 [4.112].

Рынок тонких дисплеев

Одним из актуальных направлений развития индустрии производства дисплеев является переход к гибким экранам. Такие устройства требуют и новых оптических материалов, а именно ультратонкого (толщина порядка 10–50 мкм) покровного стекла. По прогнозам аналитиков, [4.113] рынок гибких дисплеев вырастет в 30 раз за последующие десять лет, обеспечивая стабильное развитие отрасли ультратонкого стекла.

4.4. Двумерные кристаллы для фотоники и оптоэлектроники

Графен и другие двумерные (2D) кристаллы в настоящее время привлекают огромное внимание научного сообщества, обладая уникальными механическими, электрическими, тепловыми и, в сочетании с перечисленным, интересными оптическими свойствами.

В частности, специфическая структура и экстраординарные физические свойства графена открывают большие перспективы его применения в наноэлектронике [4.114] и других областях. На текущий момент опубликовано множество отчетов об успешном использовании графена в различных оптоэлектронных приложениях: фотодетекторах [4.115] и оптических модуляторах [4.116] в областях электромагнитного спектра от терагерцового до ультрафиолетового диапазона включительно. Основными свойствами, делающими графен чрезвычайно перспективным материалом для оптоэлектроники, являются возможность управления его электронно-транспортными свойствами путем электрического допирования, большая подвижность носителей и широкий спектральный диапазон оптического поглощения. Благодаря этим свойствам, на основе графена потенциально возможна реализация быстродействующих широкополосных электрооптических модуляторов и фотоприемников для оптических систем связи. Кроме того, наблюдается тенденция к интеграции на кремниевых чипах различных оптических компонент с электрическими схемами, что побуждает исследователей искать новые КМОП-совместимые фотонные материалы и технологии, в которых использование графена также перспективно.

Другое семейство двумерных материалов — дихалькогениды переходных металлов (ДПМ), такие как дисульфид молибдена (MoS_2) и диселенид вольфрама (WSe_2) — также представляет в настоящее время огромный интерес для исследователей. Некоторые двумерные ДПМ являются полупроводниками, имеющими, в отличие от графена, значительную (около 2 эВ) величину энергетической щели, что делает возможным создание на их основе логических транзисторов [4.117], источников излучения [4.118], фотогальванических

солнечных батарей [4.119] и других устройств. Кроме того, физические свойства монослойных ДПМ существенно отличаются от свойств их объемных аналогов. Например, тип электронных переходов между зонами бывает прямым и непрямым, в зависимости от количества слоев ДПМ [4.120]. Кроме того, большая энергии связи экситонов, оптический дихроизм, связанный с возбуждением электрон-дырочных пар в различных долинах, и когерентность возбужденных состояний в монослоях, открывают потрясающие возможности для создания множества новых устройств обработки информации [4.121].

Модуляторы на основе низкоразмерных материалов

Оптический модулятор — это устройство, позволяющее изменять амплитуду, фазу, поляризацию или интенсивность оптического сигнала во времени. Для большинства приложений наибольший интерес представляет амплитудная модуляция сигнала. Создание компактных оптических модуляторов с большой пропускной способностью является важной задачей оптоэлектроники. Полупроводниковые модуляторы активно исследовались в течение последних лет, однако размер этих устройств составлял миллиметры по причине малой величины электронно-оптических эффектов. Интеграция кремниевых модуляторов с высокодобротными оптическими резонаторами увеличивает эффективную величину модуляции, однако эти устройства имеют узкую полосу пропускания и требуют сложного оптического дизайна. В связи с этим поиск новых материалов, демонстрирующих эффекты модуляции, представляет практический интерес.

Графен характеризуется оптическим поглощением в широкой спектральной области от видимого до среднего ИК диапазона [4.122]. На основе спектроскопических исследований в инфракрасном диапазоне было показано [4.123, 4.124], что ярко выраженные межзонные переходы в графене существенно зависят от приложенного затворного напряжения (электрического допирования). Возможность изменения энергетического положения межзонных переходов открывает путь к модуляции оптических характеристик графена с помощью изменяющегося во времени электрического

напряжения и указывает на возможную перспективность этих материалов для приложений в области инфракрасной оптики и оптоэлектроники, то есть графен обладает потенциалом для использования в качестве активной среды в оптических модуляторах. Однако, одной из проблем, препятствующих прямому использованию графена в качестве модулятора, является ограниченное поглощение монослоя. Данная трудность может быть преодолена путем интеграции графена с оптическим волноводом, который значительно увеличивает площадь взаимодействия излучения с веществом.

Оптические модуляторы на основе схемы графен-волновод имеют ряд преимуществ:

- широкий частотный диапазон, в котором может работать устройство. Из-за того, что высокочастотная проводимость графена для дираковских фермионов постоянна, оптическое поглощение не зависит от длины волны и охватывает спектр от телекоммуникационных частот до ближнего и дальнего ИК диапазона;
- высокая частота модуляции, благодаря исключительно высокой подвижности носителей и малой паразитной емкости [4.125];
- совместимость с КМОП схемами.

На сегодняшний день были реализованы несколько прототипов электрооптических модуляторов путем интегрирования графена с кремниевым волноводом [4.126, 4.127]. Первое экспериментально реализованное устройство такого типа было продемонстрировано в работе [4.126]. Его структура схематично показана на Рисунке 4.14. В данной работе модулятор состоял из монослоя графена, нанесенного на волновод из легированного кремния, покрытого сверху тонким изолирующим слоем Al_2O_3. Для контроля уровня Ферми на металлические контакты, один из которых соединялся с графеном, а другой — с самим волноводом, подавалось внешнее напряжение. При приложенном напряжении в 3.5 В была продемонстрирована максимальная глубина и максимальная частота модуляции 3 дБ и 1.2 ГГц, соответственно. Тем не менее, у такой схемы устройства имеется ряд недостатков. Поскольку замыкание электрического контакта происходит через волновод, его материал должен быть проводящим, вследствие чего в нем неизбежно должно происходить

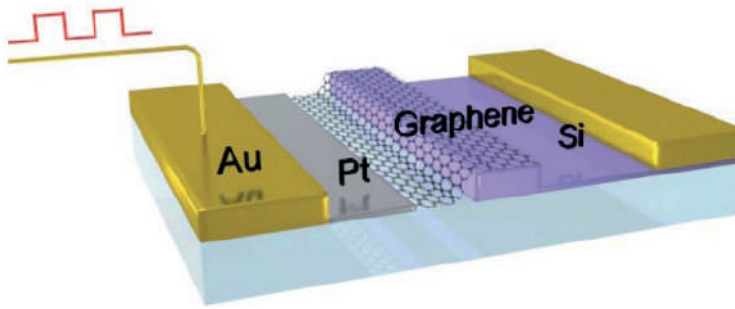


Рисунок 4.14 — Схема высокоскоростного модулятора на основе монослоя графена интегрированного с оптическим волноводом

Источник: [4.126]

поглощение излучения свободными зарядами и, в результате, возрастание внутренних потерь. Это также ограничивает максимальную частоту модуляции из-за существенной RC-задержки, которую не удается уменьшить, например, за счет увеличения степени легирования кремния, заметно не ухудшив его оптические свойства, в первую очередь — прозрачность.

Для преодоления упомянутых трудностей в работе [4.126] было предложено использовать схему с двумя монослоями графена на оптическом волноводе [4.127]. Схема нового устройства и принцип его работы аналогичны обсуждавшемуся выше, за исключением того, что волновод в нем выполнен из нелегированного кремния (может использоваться любой прозрачный диэлектрический материал) и покрыт двумя монослоями графена, разделенными изолирующим слоем Al_2O_3. К монослоям графена подсоединены металлические контакты, на которые, подается сигнал. В данной схеме при напряжении в 6 В была продемонстрирована максимальная глубина и частота модуляции 6,5 дБ и 1 ГГц, соответственно.

Общим недостатком двух упомянутых схем модуляторов является то, что для достижения заявленных характеристик необходимо реализовать большую площадь взаимодействия излучения с графеном, в результате чего требуется использовать покрытый графеном волновод длиной в 25–40 мкм.

Совсем недавно был продемонстрирован интегрированный с фотонным кристаллом модулятор на основе графена с высокой подвижностью носителей заряда, имеющий резонанс в телекоммуникационном частотном диапазоне на длине волны 1550 нм [4.128]. Схема прибора показана на Рисунке 4.15.

В 2013 году размер рынка оптических модуляторов оценивался в $230 млн., и он до сих пор продолжает расти. Чтобы получить доступ к этому рынку, следует предложить лучшие эксплуатационные характеристики. Миниатюризация устройств может повысить их энергетическую эффективность и скорость.

Была продемонстрирована максимальная глубина модуляции 3.2 дБ при приложенном напряжении в 2.5 В. Максимальная частота модуляции составила 1.2 ГГц. При дальнейшей миниатюризации прибора возможно достичь существенно больших частот модуляции, вплоть до 100 ГГц.

Фотоприемники на основе низкоразмерных материалов

Разработка фотодетекторов продолжается последние несколько десятилетий параллельно развитию области полупроводниковой микроэлектроники. За эти годы в научные исследования и производственные технологии фотодетектирующих устройств вложены огромные усилия и значительные финансовые средства со стороны государств и частных инвесторов. В настоящее время, как и ранее, основой для промышленного производства фотодетекторов являются, ввиду их надежности и масштабируемости, кремниевые полупроводниковые технологии. Тем не менее, уже сейчас основной спрос на научные исследования в области как полупроводниковых устройств в целом, так и фотодетекторов в частности, связан с использованием и интеграцией в уже существующие кремниевые технологии новых низкоразмерных материалов (таких, как графен, углеродные нанотрубки (УНТ) и слоистые материалы на основе дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ)). Более того, поскольку в настоящее время кремниевые полупроводниковые технологии уже практически достигли предела миниатюризации, в ближай-

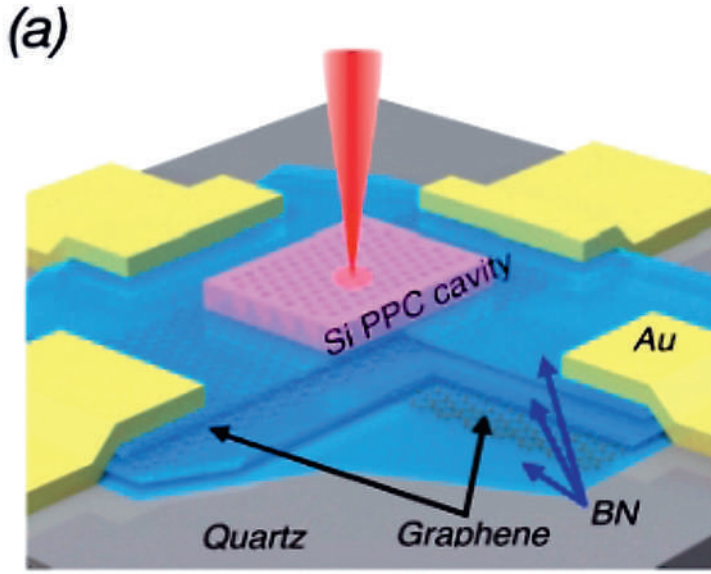


Рисунок 4.15 — Схема высокоскоростного модулятора на основе графена интегрированного с фотонным кристаллом

Источник: [4.128]

шем будущем стоит ожидать еще большего интереса к данной области исследований.

Особое место среди низкоразмерных материалов для фотонных применений занимает графен. Несмотря на то, что он имеет бесщелевой энергетический спектр и, как следствие, у стандартных фотодетекторов на основе полупроводникового гетероперехода в графене присутствуют большие темновой ток и шумы, высокая подвижность носителей заряда и возможность управления электрооптическими свойствами делают его отличным материалом для оптоэлектрических модуляторов и фотодетектирующих устройств.

Двумерные материалы на основе дихалькогенидов переходных металлов также имеют свои перспективы в создании новых оптоэлектронных устройств — фотодетекторов, солнечных батарей, панелей дисплеев и др. Они могли бы стать более дешевой заменой полупроводникам III–V

групп, используемых в настоящее время для этих приложений. У имеющихся альтернатив, наподобие органических полупроводников, присутствуют недостатки, вызванные деградацией характеристик со временем. В то же время 2D-ДПМ-материалы обладают существенно большей стабильностью, в том числе и к значительным механическим деформациям. Это открывает возможность для их использования во встраиваемых сенсорных, вычислительных, телекоммуникационных или визуализационных устройствах, имеющих спортивно-медицинское, космическое или военное назначение.

В настоящее время считаются перспективными следующие схемы фотодетекторов на основе низкоразмерных материалов: полевые транзисторы с нижним затвором (backgate), болометры, гетеропереходы графен-полупроводник и гибридные фототранзисторы. Ниже приведена более подробная сводка характеристик различных типов фотодетекторов (Таблица 4.6).

Таблица 4.6 — Характеристики некоторых фотодетекторов на основе двумерных материалов, в т. ч. внутренняя и внешняя квантовая эффективность (IQE/EQE) [4.114]

Источник	Описание	Чувствительность	Тип детектора	Полоса пропускания	Диапазон волн	IQE, %	EQE, %
1	2	3	4	5	6	7	8
[4.129, 4.130]	Переход графен-металл	6.1 мА/Вт	Фото-/фототермоэлектрический (ФЭ/ФТЭ)	Более 40 ГГц	Видимый, БИК	10	0.5
[4.131–4.133]	Графеновый p-n переход	10 мА/Вт	ФТЭ		Видимый	35	2.5
[4.134–4.136]	Графен связанный с волноводом	0.13 А/Вт	ФЭ/ФТЭ	Более 20 ГГц	1.3–2.75 мкм	10	10
[4.137]	Графен-Si гетеропереход	0.435 А/Вт	Фотодиод Шоттки	1 кГц	0.2–1 мкм		65

см. Окончание Табл. 4.6. на с. 113

Окончание Табл. 4.6.

1	2	3	4	5	6	7	8
[4.138]	Смещенный графен при комнатной температуре	0.2 мА/Вт	Болометр		Видимый, ИК		
[4.139]	Двуслойный графен с двумя затворами при низкой температуре	105 В/Вт	Болометр	Более 1 ГГц	10 мкм		
[4.140]	Гибрид графен-КТ (квантовые точки)	108 А/Вт	Фототранзистор	100 Гц	0.3–2 мкм	50	25
[4.141]	Графен с ТГц-антенной	1.2 В/Вт	Сильно затухающие плазменные волны		1000 мкм		
[4.142]	Графеновая встречно-штыревая антенна	5 нА/Вт	Фотоэлектрический, фотовынужденный болометрический	20 ГГц	2.5 ТГц		
[4.143, 4.144]	Графен-ПМД-графен гетероструктура	0.1 А/Вт	Вертикальный фотодиод		Менее 650 нм		30
[4.145]	Смещенный MoS_2	880 А/Вт	Фотопроводник	0.1 Гц	Менее 700 нм		
[4.146]	Гетероструктура на основе двухслойного графена	Более 1 А/Вт	Фототранзистор	1 Гц	0.5–3.2 мкм		
[4.118, 4.147, 4.148]	WSe_2 p-n переход	16 мА/Вт	p-n фотодиод		Менее 750 нм	60	3
[4.149]	GaS нанолист	19.1 А/Вт	Фотопроводник	Более 10 Гц	0.25–0.5 мкм		

Несмотря на отсутствие щели в энергетическом спектре, отдельные фотодетекторы, в частности, устройства на основе перехода графен-металл показывают чрезвычайно сильный фотоотклик, характеризующийся внутренней квантовой эффективностью (IQE) до 10% и временем релаксации до 25 пс [4.129]. Другая схема фотодетектора на основе графена со множеством чередующихся верхних затворов из металлов с различной работой выхода, показала эффективную работу в системе передачи информации со скоростью 10 Гб/с [4.130]. Другим подходом, направленным на увеличение квантовой эффективности и, фотоотклика графеновых фотодетекторов, является резонансное возбуждение плазменных колебаний (плазмонов) в графене, что позволяет увеличить относительно низкое оптическое поглощение монослоя графена с 2.3% до более чем 60% [4.150].

Все упомянутые в таблице устройства по своим параметрам превосходят или, по крайней мере, находятся на уровне уже существующих решений, работающих в соответствующем температурном и частотном режиме и прошедших этап коммерциализации. Тем не менее, на текущий момент все данные разработки являются штучными, не адаптированными для серийного производства и интеграции с другими микроэлектронными компонентами, что препятствует их внедрению в практику. К настоящему времени самым известным успешным примером коммерциализации технологии производства устройств на основе графена является производство прозрачных проводников для тактильных датчиков (touch sensors) [4.151].

Необходимо также отметить перспективы использования графена в биомедицинских технологиях, в частности, в производстве биосенсоров. В настоящее время уже продемонстрирована успешная работа графеновых биотранзисторов, способных детектировать некоторые онкомаркеры [4.152]. Основные функции графена в такого рода устройствах заключаются в абсорбции биомолекул и изменении его электрических и оптических свойств при активировании биомолекул, в результате присоединения к ним специфичного антигена. Таким образом, практически любой фотодетектор в приведенной выше таблице, геометрия которого допускает наличие свободной поверхности графена, может быть адап-

тирован для работы в качестве биосенсора. И если производство данных фотодетекторов для использования в вычислительных или телекоммуникационных устройствах не может конкурировать по цене и другим параметрам с уже имеющимися микроэлектронными технологиями на основе кремния, в случае биомедицинских технологий ситуация другая. Ввиду достаточно высокой цены анализов на наличие специфических антигенов в биоматериале, штучно произведенное устройство, адаптированное к повторному использованию в течение определенного срока, имеет большие перспективы быть конкурентоспособным на рынке уже существующих решений. Нет сомнений, что как только проблемы, связанные с масштабируемостью и интегрируемостью в уже существующие технологии микроэлектроники и возможностью серийного производства, будут решены, фотодетекторы на основе новых низкоразмерных материалов существенным образом преобразят весь рынок технологий оптоэлектроники.

Среди основных производителей фотодетекторов следует отметить: Avago Technologies (US), Banner Engineering Corp. (US), Banpil Photonics, Inc. (US), Baumer Holdings AG (Switzerland), BaySpec, Inc. (US), Brandywine Photonics LLC (US), Dongbu HiTek Co. Ltd. (Korea), FUJIFILM Holdings Corporation (Japan), Hamamatsu Photonics K K. (Japan), Honeywell International Inc. (US), Ibsen Photonics A/S (Denmark), Mitsubishi Electric Corporation (Japan), NTT Electronics (Japan), OMRON Corporation (Japan), ON Semiconductor Corporation (US), Prime Photonics, LC (US), Samsung Electronics Co. Ltd. (South Korea), Smart Fibres Limited (UK), Toshiba Corporation (Japan).

Источники излучения на основе низкоразмерных материалов

В настоящее время существует заметный интерес к наноразмерным источникам света, связанный с возможностью их интегрирования в сверхбыстрые чипы с оптическими межсоединениями, которые могли бы использоваться в будущих вычислительных, телекоммуникационных и визуализационных системах. Первые электролюминесцентные источники среднего ИК диапазона на основе графена на SiO_2 подложках

отличались малой эффективностью [4.153, 4.154]. Недавно были продемонстрированы источники видимого диапазона, на основе свободно подвешенного графена [4.155]. Наблюдалось яркое излучение в видимом диапазоне за счет горячих электронов (~2,800 K). Кроме того, было показано, что сильная оптическая интерференция между подвешенным графеном и кремниевой подложкой может быть использована для настройки спектра излучения. Стоит отметить, что устройство [4.155] было изготовлено с использованием процесса химического осаждения паров (CVD) графена, что является масштабируемой технологией производства. Таким образом, можно констатировать, что первый важный шаг на пути реализации коммерческих атомарно тонких, гибких и прозрачных источников света с низким рабочим напряжением уже сделан.

Особо следует отметить однофотонные источники света, которые имеют особо важное значение в технологиях квантовых вычислений и шифрования. Благодаря использованию низкоразмерных материалов, таких как одиночные молекулы [4.156], квантовые точки [4.157], изолированные вакансии азота (NV-дефекты) внутри алмаза [4.158], или одномерные материалы [4.159], в последнее время был достигнут прогресс в данной области. Недавно также были впервые продемонстрированы однофотонные источники света на основе двумерных полупроводников, в частности, диселенида вольфрама (WSe_2) [4.159–4.164]. На текущий момент в России коммерческим производством однофотонных источников света занимается компания «Фотонные Нано Мета Технологии».

Заключение

В данном разделе рассмотрено состояние научных исследований и технологических разработок за рубежом и в России в области применения низкоразмерных материалов в области оптоэлектроники. В отличии от традиционных материалов на основе гетероструктур III–V и II–VI групп, новые двумерные материалы намного дешевле в изготовлении и позволяют эффективно контролировать оптические свойства путем приложения электрического поля. Высокая подвижность зарядов позволяет изготавливать устройства, работающие

в частотном диапазоне выше 10 ГГц. Тем не менее, несмотря на большой успех, достигнутый в научной сфере за последние несколько лет, на текущий момент примеры коммерциализации технологий в данной области немногочисленны.

4.5. Однослойные углеродные нанотрубки в фотонике и оптоэлектронике

Углеродные нанотрубки (УНТ) — уникальный наноматериал, обладающий удивительными свойствами. Получение УНТ относят к важнейшим достижениям в области материаловедения за последние 50 лет [4.165].

Научная работа, спровоцировавшая всплеск интереса к этому материалу, была опубликована в 1991 году профессором Иидзима [4.166]. В ней была продемонстрирована структура двухслойных (ДУНТ) и многослойных (МУНТ) углеродных нанотрубок. Спустя всего два года возможность получения однослойных углеродных нанотрубок (ОУНТ) была независимо экспериментально доказана двумя исследовательскими группами: Иидзимой и Ичихаши [4.167] и Бетьюном и сотр. [4.168]. Эти работы стали отправной точкой для исследования свойств и способов получения УНТ. Однако, исследования УНТ начались задолго до этих работ. УНТ были синтезированы еще в конце XIX века [4.169], но возможность экспериментально подтвердить их структуру возникла лишь в середине XX века с появлением просвечивающей электронной микроскопии [4.170, 4.171]. Впоследствии исследованию УНТ и нановолокон было посвящено много работ как в зарубежной, так и отечественной литературе [4.172–4.181].

УНТ и особенно ОУНТ имеют уникальные механические, тепловые и электрические свойства [4.182–4.184]. ОУНТ являются самым прочным из всех известных материалов с исключительно высоким модулем Юнга и прочностью на растяжение [4.185, 4.186]. Большой интерес для многих применений представляет их высокая продольная теплопроводность. Возможность получения как полупроводниковых, так и металлических УНТ и их устойчивость к пропусканию высоких токов являются важными свойствами в микро- и наноэлектронике для создания быстродействую-

щих транзисторов, элементов памяти, сенсоров, переключателей, а также для применения УНТ в качестве проводников в интегральных схемах.

С начала 90-х годов прошлого столетия количество научных работ, посвященных УНТ, неуклонно росло. Пик количества научных статей приходится на 2013 год. Последующее снижение количества публикаций можно объяснить переходом от исследований свойств материала к исследованию его применений. Вместе с тем наблюдается рост интереса к новому углеродному наноматериалу — графену, а также его аналогам (например, халькогенидным соединениям переходных металлов, нитриду бора, фосфорену, борофену и многим другим).

В настоящее время в повседневном обиходе начинают появляться товары на основе УНТ. С увеличением объемов производства УНТ и снижением цен, все более широкое распространение приобретают композитные материалы на их основе. Связано это, в первую очередь, с тем, что нанотрубки, введенные в матрицу, существенно изменяют свойства матричного материала, такие как теплопроводность и электропроводность, а также его оптические и механические свойства [4.187–4.191]. Сегодня в свободной продаже можно найти сверхлегкие велосипедные рамы (BMC SLC01 Pro Machine, $3650), горные лыжи (La Sportiva Vapor Nano, $1200), бейсбольные биты (Easton LCN6 Stealth Comp CNT Youth Baseball Bat, $72) и турбины ветряных электростанций, произведенные из композитных материалов, содержащих УНТ. Другое применение УНТ, которое уже вышло на промышленное производство — прозрачные проводящие покрытия. В этой области УНТ и особенно ОУНТ могут заменить дорогой и редкий оксид индия, легированный оловом (indium tin oxide, ITO), который является отраслевым стандартом и используется в подавляющем большинстве электронных устройств. Сейчас проводящие покрытия, созданные из ОУНТ, демонстрируют характеристики, близкие к характеристикам ITO. Кроме того, в отличие от хрупкого ITO, ОУНТ могут использоваться в гибких и эластичных устройствах. Краткий перечень существующих и возможных применений УНТ представлен на Рисунке 4.16.

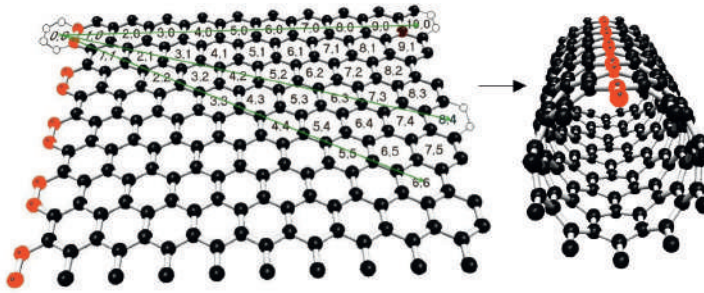
Синтез МУНТ хорошо изучен и, по сравнению с ОУНТ, менее затратен в килограмовом эквиваленте. Поэтому сегодня массовое производство МУНТ уже широко налажено. Однако, применение МУНТ в области фотоники и оптоэлектроники ограничено их оптическими и электрическими свойствами, и их шире применяют в композиционных материалах и батареях. Этот раздел сфокусирован только на использовании ОУНТ в фотонике и оптоэлектронике, так как их оптические и электрические свойства достаточно хорошо изучены и перспективность устройств на их основе была показана экспериментально и теоретически [4.192–4.194]. Кроме этого, в статье не затрагиваются нанотрубки на основе других материалов (например, BCN-нанотрубки [4.195]), нанотрубки из нитрида бора [4.196–4.198], нитрида галлия [4.199] и др. [4.200–4.204]).

Структура УНТ

УНТ можно представить, как свернутые листы графена, двумерного материала, состоящего из единственного атомного слоя углерода. Направление сворачивания графенового листа определяет хиральность нанотрубки. Различают нанотрубки трех видов: «кресло» (armchair), «зигзаг» (zig-zag) и хиральные (chiral). Хиральность нанотрубок обозначают



Рисунок 4.16 — Некоторые области применения углеродных нанотрубок



Для создания УНТ необходимо совместить шестиугольники (0, 0) и (10,0). Также показаны направления для сворачивания нанотрубки типа «кресло» (6, 6) и хиральной нанотрубки (8, 4)

Рисунок 4.17 — Схематическая иллюстрация сворачивания ОУНТ типа «зигзаг» с хиральностью *(10, 0)*

вектором *(m, n)*, координаты которого указывают на шестиугольник, который необходимо совместить с началом координат *(0, 0)* для получения нанотрубки.

Получение однослойной углеродной нанотрубки типа «зиг-заг» с индексами *(10, 0)* из графенового листа показано на Рисунке 4.17.

Хиральность ОУНТ определяет не только ее строение и диаметр, но и электрические свойства. Если $n = m$, то ОУНТ является металлическим проводником, если же разность $(n-m)$ делится на 3 без остатка, то полуметаллом. Во всех остальных случаях ОУНТ проявляет полупроводниковые свойства.

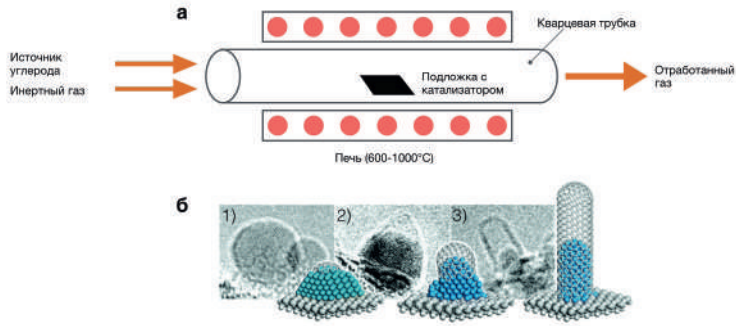
Синтез УНТ

Известны несколько методов синтеза углеродных нанотрубок, включая химическое осаждение из газовой фазы, дуговой разряд и лазерную абляцию. По способу атомизации углерода все методы можно разделить на физические и химические. Химический метод синтеза УНТ основан на использовании катализатора, который вызывает или ускоряет процесс разложения источника углерода. Физический способ синтеза нанотрубок включает в себя процессы возгонки и де-

сублимации углерода. Возгонка углерода может быть осуществлена дуговым разрядом, лазерным или индукционным нагревом [4.168, 4.205, 4.206] Основными недостатками физических методов синтеза являются большой расход энергии на возгонку, необходимость использования пониженных давлений, низкий выход УНТ, высокая себестоимость источника углерода (графита) и сложность автоматизации и масштабирования технологических процессов. Кроме того, нанотрубки, синтезированные методом возгонки-десублимации, находятся в запутанной форме (в виде пучков), и для их применения необходимо провести их разделение и химическую очистку. Физические методы синтеза были популярны на стадии становления исследований в области получения УНТ. Для массового производства УНТ физические способы синтеза не подходят, так как они не предоставляют достаточного контроля условий. Более точный контроль процесса роста и, соответственно, свойств получаемых УНТ, может быть достигнут при использовании химических методов синтеза.

Химический синтез основан на каталитическом разложении источника углерода. Очевидным преимуществом этого метода является возможность роста углеродных нанотрубок при относительно низких температурах (около 600–1000° С). Химические методы могут быть разделены на метод с катализатором на носителе (substrate supported catalyst) [4.207–4.209] и метод летучего катализатора (floating catalyst) [4.210–4.212]. В первом методе процесс разложения источника углерода и рост УНТ происходят на катализаторе, находящемся на поверхности подложки (Рисунок 4.18а). В качестве подложки может использоваться окисленный монокристаллический кремний [4.213], кварцевое стекло [4.214], графит [4.215], а также вещества с развитой поверхностью SiO_2 [4.216], MgO [4.217], Al_2O_3 [4.218], $CaCO_3$ [4.219],и цеолит [4.220]. Процесс роста ОУНТ в ходе химического синтеза проиллюстрирован на Рисунке 4.18б. В методе летучего катализатора процесс роста УНТ протекает на поверхности частиц, взвешенных в газе. в виде аэрозолей, поэтому часто его называют аэрозольным.

В качестве катализатора обычно используют переходные металлы, в основном Fe, Ni и Co. Их роль сводится к накоплению углерода и его сегрегации в виде УНТ или нановолокон,



а -Схематическое изображение оборудования для синтеза ОУНТ методом химического осаждения из газовой фазы с катализатором на носителе;
б — Образование ОУНТ в процессе роста с катализатором на носителе:
1 — первым этапом роста ОУНТ является образование шапки, которая является половиной фуллерена;
2 — структура ОУНТ приподнимается над частицей катализатора; частица катализатора изменяет форму в соответствии с формой растущей ОУНТ;
3 — установившийся режим роста ОУНТ. Адаптировано с разрешения издателя [4.221]. Авторские права American Chemical Society, 2007.

Рисунок 4.18 — Синтез ОУНТ.

Источник: [4.221]

что обусловлено хорошей растворимостью углерода в этих металлах. Также исследуются металлы, которые раньше трудно было представить в качестве катализаторов роста ввиду ограниченной растворимости углерода — Au [4.222, 4.223], Pd [4.222], Ag [4.222], Pb [4.224], Mn [4.223, 4.225], Cr [4.223], Ru [4.226], Mo [4.227], Cu [4.222, 4.228]. Неметаллы, например, SiO_2 [4.229, 4.231], Si [4.229], SiC [4.232], Ge [4.232], Al_2O_3 [4.233], ZrO_2 [4.234], ZnO [4.235], фуллерен C_{60} [4.236], наноалмаз [4.237], могут быть эффективными катализаторами синтеза УНТ. Использование фуллеренов и наноалмазов в качестве катализатора позволяет получить УНТ, не содержащие других элементов, кроме углерода. Структура и свойства УНТ

зависят от типа и свойств катализатора. Так, было обнаружено, что во многих случаях каталитическая активность частиц определяется их размером и специфической обработкой непосредственно перед синтезом УНТ.

Вдобавок к катализатору, во многих процессах используют промотирующие агенты. Так, например, небольшие добавки серы или серосодержащих соединений (тиофена и сероводорода) [4.238, 4.239], а также фосфора (трифенилфосфина) [4.240] могут значительно повысить выход наноуглеродных материалов.

Наибольшее распространение в качестве источников углерода в химическом методе получили метан, ацетилен, этиловый спирт, этилен и монооксись углерода [4.238, 4.241]. Практически любое углеродное соединение может быть использовано для синтеза УНТ. Были успешно протестированы натуральные источники — камфорные соединения, терпентинное и эвкалиптовое масло, полезные ископаемые (уголь, сжиженный нефтяной, природный и угольный газы), керосин и другие органические полимеры [4.238, 4.242, 4.243].

Метод химического осаждения из газовой фазы является одним из наиболее перспективных методов для синтеза УНТ в контролируемых условиях. В зависимости от целей, производство УНТ можно рассматривать с точки зрения либо крупномасштабного синтеза УНТ для их последующей очистки и дальнейшего использования в различных приложениях, либо синтеза УНТ определенной чистоты и морфологии для их непосредственного применения. Каждое из этих направлений имеет свои особенности и определенные приложения. Реализации первого подхода способствуют хорошо изученные методы очистки УНТ. Кроме того, возможность функционализации УНТ открывает новые перспективы для дальнейшего манипулирования УНТ в водной или органической среде с целью их последующего непосредственного использования или введения в композитные материалы. В последние годы были разработаны методы разделения УНТ по свойствам на металлические и полупроводниковые [4.244, 4.245] и даже выделения УНТ с определенной хиральностью [4.246, 4.247]. Масштабирование метода химического осаждения из газовой фазы является особенно важным, так как именно невозможность массового производства УНТ являются барьером

для многих перспективных применений, которые сейчас ограничены ценой и доступностью наноматериала.

Второй подход направлен на синтез УНТ для их прямого применения, с минимизацией количества промежуточных стадий между синтезом и использованием. С промышленной точки зрения, это означает синтез на определенном носителе или аэрозольный синтез и последующее осаждение или перенесение УНТ на подложку, на которой они будут использоваться. Это исключает трудоемкие этапы очистки УНТ от катализатора и носителя, а также диспергирования УНТ в жидкостях перед их осаждением на подложку. Аэрозольный метод, который позволяет получать относительно чистые и высококачественные ОУНТ в непрерывном режиме, является наиболее предпочтительным для развития этого подхода [4.248–4.250].

Электрические и оптические свойства ОУНТ

Электрические и оптические свойства ОУНТ обусловлены наличием сингулярностей ван Хова (van Hove singularities), то есть энергетических уровней со значительно повышенной плотностью состояний. Наличие сингулярностей ван Хова определяет следующие особенности оптических свойств ОУНТ:

- оптические переходы происходят между состояниями $v_1 \rightarrow c_1$, $v_2 \rightarrow c_2$ и так далее, а переходы $c_1 \rightarrow v_2$, $c_2 \rightarrow v_1$ запрещены и проявляются крайне слабо;
- энергии между сингулярностями Ван Хова зависят от структуры нанотрубок, следовательно, оптические свойства УНТ можно изменять, варьируя их структуру;
- высокая энергия и выраженность оптических переходов позволяют провести выборочное возбуждение УНТ с определенным индексом *(n, m)*, а также зарегистрировать оптические сигналы индивидуальных УНТ.

Наличие сингулярностей ван Хова объясняется квазиодномерным характером движения носителей заряда в системах с высоким отношениям длины к площади поперечного сечения [4.251]. Спектр поглощения ОУНТ в УФ, видимом и ближнем ИК-диапазоне имеет ярко выраженные пики, которые соответствуют переходам между сингулярностями ван

Хова [4.252]. Поглощение ОУНТ обусловлено их электронными переходами.

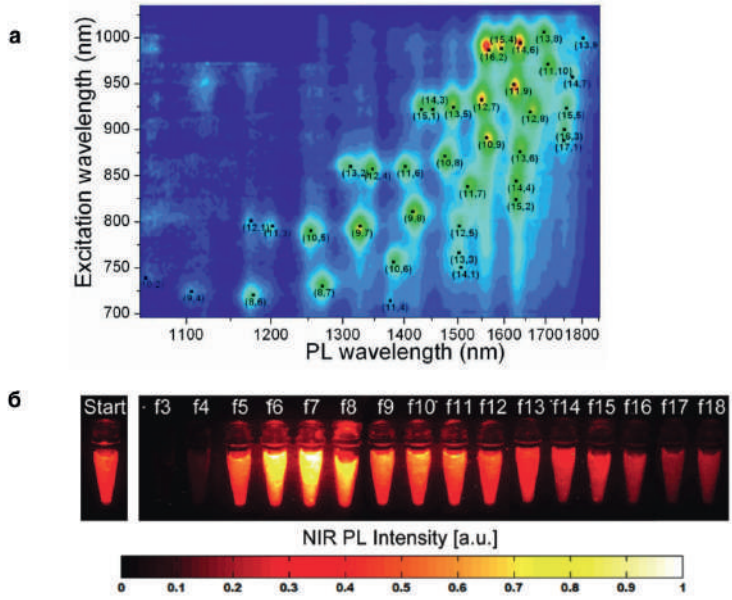
Было показано, что по положению пиков в спектре поглощения ОУНТ можно оценить диаметр ОУНТ. В своей работе [4.253] Катаура и сотрудники провели расчеты электронных переходов в ОУНТ в зависимости для разных хиральностей УНТ.

Индивидуальные полупроводниковые ОУНТ при фотовозбуждении производят излучение в ближней ИК-области [4.254, 4.255]. Это свойство называют флуоресценцией или фотолюминесценцией. Фотолюминесценция ОУНТ позволяет говорить о возможности их применения в качестве контрастных агентов для диагностики *in vitro* и *in vivo* [4.256–4.260] так как они испускают излучение в диапазоне биологической прозрачности (800 nm, 1100–1500 nm).

Механизм флуоресценции описывают следующим образом: электрон в ОУНТ поглощает падающее излучение через электронный переход E_{22}, при этом создается электронно-дырочная пара (экситон). И электрон, и дырка релаксируют из состояния c_2 в c_1 и из v_2 в v_1, соответственно. Затем происходит их рекомбинация через переход c_1-v_1, следствием которой и является световое излучение.

Карта фотолюминесценции ОУНТ, полученных с помощью синтеза из монооиси углерода под высоким давлением (HiPCO — High Pressure Carbon Monoxide) [4.261], представлена на Рисунке 4.19. Ранее считалось, что фотолюминесценция является характерным свойством индивидуальных полупроводниковых ОУНТ (то есть ОУНТ с индексами хиральности *(n, m)*, где $n \neq m \neq 0$), так как в металлах кулоновское взаимодействие между электронами и дырками подавляется за счет свободных электронов. Однако, в отличие от классических металлов, металлические ОУНТ являются одномерной системой. В одномерных системах, кулоновские взаимодействия значительно усиливаются, и возможно образование стабильных экситонов [4.262–4.264].

В полупроводниках существует несколько механизмов рекомбинации электрон-дырочных пар. Как правило, излучается тепловая энергия, но в ряде случаев происходит излучение фотонов. Это явление называют электролюминесценцией, и оно используется в различных электронных устройствах, включая светодиоды. Приложение разности



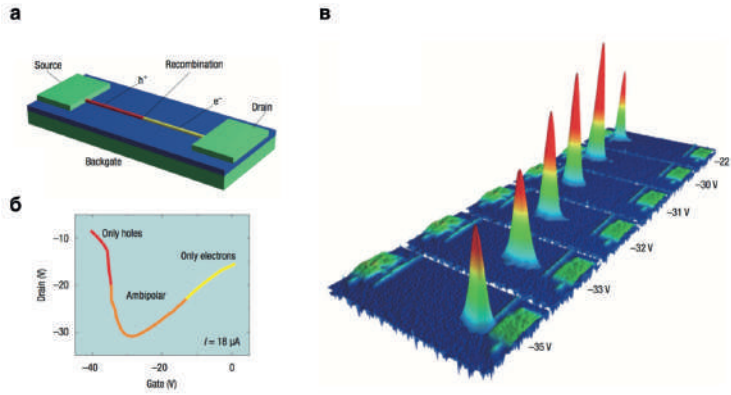
а) Карта фотолюминесценции ОУНТ показывает только нанотрубки с индексами (n, m), проявляющие полупроводниковые свойства. ОУНТ с индексами n = m и m = 0 не обладают способностью к фотолюминесценции;
б) флуоресценция ОУНТ в ближнем ИК диапазоне. Адаптировано с разрешения издателя из [4.254]. Авторские права American Chemical Society, 2010.

Рисунок 4.19 — Фотолюминесценция ОУНТ

Источник: [4.254]

потенциалов к ОУНТ приводит к рекомбинации электронов и дырок и, следовательно, возникновению электролюминесценции. При этом характерная энергия излучения зависит от диаметра и хиральности возбуждаемых ОУНТ. Электролюминесценция ОУНТ часто наблюдается рядом с дефектами структуры ОУНТ и другими неоднородностями, которые приводят к локальному падению напряжения (Рисунок 4.20).

Исследования электролюминесценции амбиполярных полевых транзисторов на основе ОУНТ позволили сделать ряд



а — Схематическое изображение устройства. Инжекция дырок (h^+) происходит от эмиттера, электронов (e^-) — от коллектора. Излучение происходит из рекомбинационной области длиной около 1 мкм;
б — Характеристика напряжения коллектора при постоянном токе при варьировании напряжения затвора. Эмиссия наблюдается только в амбиполярном режиме (обозначен оранжевой линией);
в — Трехмерное изображение ИК эмиссии как функции напряжения затвора V_g при постоянном токе. Расположение области рекомбинации по оси ОУНТ регулируется изменением напряжения затвора; Адаптировано с разрешения издателя из [4.193]. Авторские права Nature Publishing Group, 2008.

Рисунок 4.20 — Эмиссия ИК излучения от амбиполярного полевого транзистора на основе ОУНТ.

Источник: [4.193]

интересных наблюдений: во-первых, для возникновения электролюминесценции, в отличие от традиционных p-n переходов, не требуется дополнительное допирование, во-вторых, излучение имеет выраженную поляризацию вдоль оси ОУНТ [4.265], и в-третьих, расположение источника излучения можно изменять, контролируя положение центра рекомбинации [4.266].

Устройства, использующие свойство электролюминесценции ОУНТ, были созданы на основе индивидуальных нанотрубок [4.265, 4.267, 5.268], и на основе их пленок [4.269].

Метод комбинационного рассеяния является одним из наиболее часто используемых методов оценки качества ОУНТ. Рамановский спектр углеродных нанотрубок имеет характерные полосы, положение которых позволяет судить об их чистоте и свойствах. Полосы радиальных дыхательных мод (radial breathing modes, RBM) находится в области низких частот и соответствует радиальным колебаниям атомов углерода стенок ОУНТ. G-полоса (1500–1600 $см^{-1}$) является наиболее интенсивной в рамановском спектре ОУНТ. Она обусловлена колебаниями атомов углерода в плоскости графенового слоя. В спектрах ОУНТ G-полоса, как правило, расщеплена надвое, что объясняется колебаниями атомов углерода параллельно и перпендикулярно оси нанотрубки. Интенсивность D-полосы, наблюдаемой в диапазоне 1250–1450 $см^{-1}$, указывает на степень дефектности ОУНТ. Отношение интенсивности D-полосы и G-полосы используют как характеристику качества ОУНТ. Полоса, обозначаемая как G', находится в диапазоне частот (2450–2650 $см^{-1}$) и является первым обертоном D-полосы.

Применение ОУНТ в фотонике и оптоэлектронике

Уникальные свойства ОУНТ делают их привлекательным материалом для электроники, фотоники и оптоэлектроники. Спектр возможных применений ОУНТ необычайно широк и включает использование пленок из ОУНТ или отдельных нанотрубок. При этом для каждого из возможных применений ОУНТ должны быть соблюдены соответствующие требования к материалу по качеству, количеству, диаметру, длине и электронным свойствам ОУНТ. В этом разделе мы обсудим примеры существующих устройств, созданных с помощью ОУНТ.

Фотодетекторы. В термических детекторах излучение определенной частоты вызывает изменение температуры, и приводит к изменению электрических свойств материала. Такой механизм используют в болометрах, пироэлектрических детекторах и термобатареях. В болометрах внешнее излучение нагревает материал детектора и изменение температуры приводит к изменению сопротивления материала. При этом сопротивление, в зависимости от материала, мо-

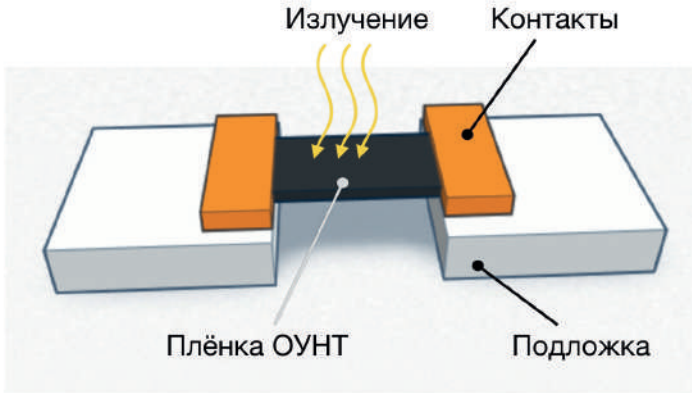
жет как увеличиться, так и уменьшиться. Эффективные болометры должны обладать высоким поглощением, высоким температурным коэффициентом сопротивления, низкой теплоемкостью и высокой термоизоляцией [4.270].

В ОУНТ-болометрах, как правило, используют пленки ОУНТ, а не индивидуальные нанотрубки. В таких устройствах пленка ОУНТ «подвешена» между двумя электродами. Низкая теплоемкость ОУНТ обеспечивает высокие перепады температуры. Наилучшие характеристики проявляют ОУНТ-болометры, охлажденные до температуры около 200K, когда электрическое сопротивление обратно пропорционально температуре. Иткису и коллегам [4.271] удалось получить ОУНТ-болометр, демонстрирующий температурный коэффициент сопротивления (ТКС) около 1–2.5%/K, что сравнимо с ТКС диоксида ванадия, который является наиболее распространенным термистором для кремниевых болометров [4.272] (Рисунок 4.21). Наилучший ТКС продемонстрирован в работе [4.273] для ОУНТ в поливинилпирролидоне и составляет 2.94%/K.

Фотонные детекторы основаны на генерации электронов и дырок при поглощении фотонов полупроводниковыми материалами. К фотонным детекторам относят приемники на фотосопротивлениях, p-n переходы, диоды Шоттки. Фотонные детекторы, как правило, демонстрируют лучшие характеристики в видимом и ближнем ИК диапазонах. В среднем ИК-диапазоне и на больших длинах волн болометры более эффективны [4.270]. Фотопроводимость пленок ОУНТ была изучена в работах [4.274, 4.275].

Кроме того, пленки УНТ можно использовать для преобразования оптического сигнала в электрический за счет явления увлечения носителей заряда фотонами [4.276, 4.277]. В работе [4.277] было экспериментально показано возникновение ЭДС на пленке ОУНТ при ее облучении лазером с наносекундой длительностью импульса. Временная форма электрического импульсов совпадает с формой падающих лазерных импульсов. Амплитуда импульсов линейно возрастает с увеличением мощности лазера и зависит от угла падения и поляризации излучения.

Транзисторы. Уникальные свойства ОУНТ позволяют использовать их в полевых транзисторах. Были



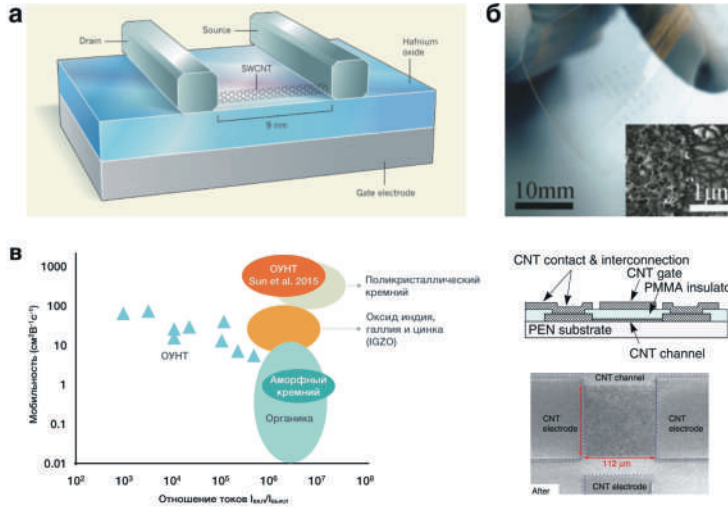
Свободностоящая пленка ОУНТ с подсоединенными контактами закреплена на подложке. При регистрации излучения происходит увеличение температуры пленки и изменение ее сопротивления;

Рисунок 4.21 — Пример устройства болометра на основе ОУНТ, предложенный в [4.271].

Источник: [4.271]

продемонстрированы транзисторы на одиночных полупроводниковых нанотрубках [4.278, 4.279] и на пленках ОУНТ [4.261, 4.280, 4.283] (Рисунок 4.22). Широкий обзор различных методов получения полупроводниковых ОУНТ представлен в работе [4.284]. В полевом транзисторе на основе ОУНТ кремниевый канал переноса носителей заряда заменяют однослойной углеродной нанотрубкой. Впервые такие транзисторы создали и описали группы из Делфтского Технического Университета и Исследовательского Центра имени Томаса Уотсона компании IBM в 1998 году.

Транзисторы на основе ОУНТ способны превзойти кремниевые по своим характеристикам. Во-первых, они демонстрируют большую скорость работы: теоретическое быстродействие ОУНТ-транзистора составляет 1 ТГц. Кроме этого, использование ОУНТ в полевых транзисторах позволит преодолеть предел миниатюризации кремниевых элементов, составляющий 12 нм. Еще одним достоинством ОУНТ-транзисторов является технологический процесс их

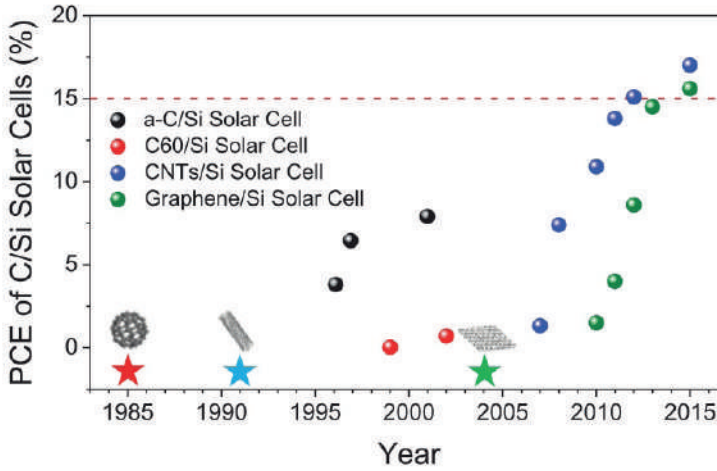


а — Устройство транзистора на основе одиночной ОУНТ. Каналом является ОУНТ длиной 9 нм;
б — ОУНТ — транзисторы на полимерной подложке и СЭМ-изображение интерфейса между электродом (слева) и полупроводником (справа);
в — Слева — сравнение характеристик тонкопленочных транзисторов на основе пленок ОУНТ с традиционными материалами, справа — схема устройства и микрофотография тонкопленочного транзистора на основе пленки ОУНТ.
а — Рисунок воспроизведен из [4.285] с разрешения издателя. Авторские права Nature Publishing Group, 2012;
б — Изображение воспроизведено с разрешения издателя из [4.286], авторские права John Wiley and Sons, 2006;
в — Рисунки адаптированы с разрешения издателя из [4.283]. Авторские права Nature Publishing Group, 2013.

Рисунок 4.22 — Устройство транзистора на ОУНТ.

Источники: [4.285, 4.286, 4.283]

производства, который значительно менее сложен и ресурсоемок, чем процесс производства кремниевых элементов. Помимо этого, ОУНТ-транзисторы могут быть практически прозрачными в оптическом диапазоне, гибкими и эластичными [4.286, 4.287]. Достигнуть такого сочетания характеристик, используя традиционные материалы, практически невозможно.



(фотоэлементы УНТ/кремний показаны синим).
Воспроизведено с разрешения издателя из [4.291].
Авторские права John Wiley and Sons, 2015.

Рисунок 4.23 — Эволюция КПД фотоэлементов на гетеропереходе углерод/кремний

Источник: [4.291]

Фотогальванические солнечные элементы. Совмещение УНТ с полимерами позволяет создавать органические солнечные элементы [4.288]. Одной из наиболее ранних попыток стало создание активного слоя органического фотоэлемента на основе УНТ с поли-(3-октилтиофен)ом (P3OT). Эффективность такого фотоэлемента составила 0.22% [4.289]. Позже были созданы устройства на основе УНТ (как однослойных, так и многослойных) и смеси поли-(3-гексатиофен) а (P3HT) и метанофуллерена PCBM [4.290]. В этих фотоэлементах эффективность составила 1.3% для МУНТ и 2% для ОУНТ.

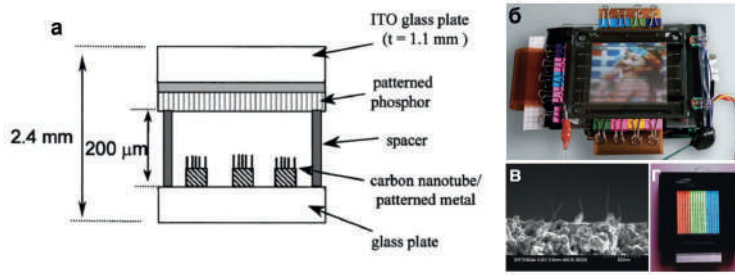
Интересны также и фотогальванические фотоэлементы на гетеропереходах, созданные с использованием ОУНТ. Подробно такие фотоэлементы рассмотрены в работе [4.291]. Эта область активно развивается, и показатели качества фотоэлементов на гетеропереходах постоянно увеличиваются. Так, в 2007 году максимальная эффективность таких фо-

тоэлементов составляла 1.31% [4.292], в 2011 году — 13.8% [4.293], а в 2015 году — 17% [4.294] (Рисунок 4.23).

Дисплеи с автоэлектронной эмиссией. В начале 2000-х годов произошел всплеск интереса к технологии плоских дисплеев с автоэлектронной эмиссией (FED-дисплеев). Технология FED-дисплеев заключается в том, что электроны, которые попадают на цветной фосфор испускаются эмиттерами большой площади. Устройство дисплея с автоэлектронной эмиссией представлено на Рисунке 4.24а. FED-дисплеи отличаются низким энергопотреблением и широким углом обзора, а также могут обновлять изображение с частотой до 240 Гц, что выше, чем у ЖК-дисплеев. Motorola занималась разработкой технологии FED-дисплеев с использованием УНТ-эмиттеров, однако сейчас оставила эту область. Sony представила прототип FED-дисплея с использованием углеродных нанотрубок в 2007 году и собиралась начать их серийное производство в 2009, однако проект пришлось закрыть из-за отсутствия инвестиций. Сегодня большую часть разработок Sony выкупила Тайваньская компания AU Optronics Corporation.

Жесткая конкуренция между различными технологиями, включая доминирующие сегодня жидкокристаллические дисплеи (Liquid Crystal Display, LCD) и набирающие все большую популярность дисплеи на органических светодиодах (Organic Light Emitting Diode, OLED), негативно сказывается на развитии дисплеев с автоэлектронной эмиссией. Для того чтобы достигнуть настоящего коммерческого успеха, FED-дисплеи должны продемонстрировать лучшее качество изображения (высокий контраст, низкое время отклика и широкий угол обзора), низкое энергопотребление, а также привлекательную для компаний-производителей стоимость.

Помимо исследования FED-дисплеев на основе УНТ, существуют также исследования автоэлектронной эмиссии гибридных материалов, в которых УНТ выступают одним из компонентов. К таким материалам относятся: упорядоченные «леса» из нанотрубок, покрытые тонкой пленкой нитрида бора [4.295], «леса» из УНТ, содержащие металлические частицы [4.296], гибриды УНТ и восстановленного оксида графена [4.297]., гибриды УНТ и алмазоподобных углеродных пленок [4.298], «пряжа» из высокоориентированных УНТ



а — Схематическое изображение устройства дисплея;
б — Прототип FED-дисплея компании Samsung (MIT Technology Review, 2004);
в — СЭМ-изображение сечения катода на основе УНТ. УНТ расположены перпендикулярно подложке и закреплены в ней;
г — Фотография работающего цветного ОУНТ FED-дисплея;
а, в и г воспроизведены с разрешения издателя из [4.300]. Авторские права AIP Publishing LLC, 1999.

Рисунок 4.24 — Дисплеи с автоэлектронной эмиссией на основе УНТ.

Источник: [4.300]

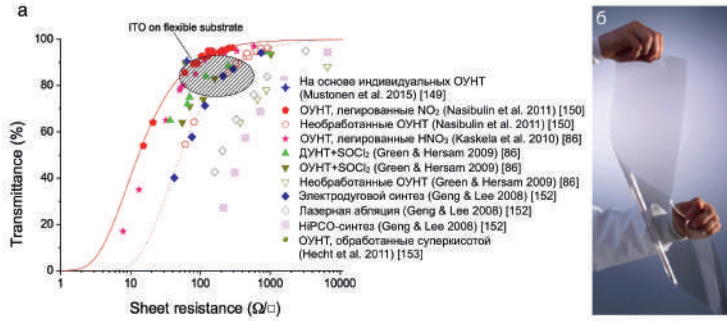
[4.299]. Эти новые технологии демонстрируют улучшенные характеристики по сравнению с не модифицированными УНТ, что, возможно, приведет к созданию материала, способного сделать технологию FED-дисплеев конкурентоспособной.

Органические светодиоды (organic light emitting diodes, OLED). ОУНТ применяют в органических светодиодах в качестве электродов, инжектирующих дырки, и в качестве слоев для переноса заряда [4.301]. Используют композиты ОУНТ и сопряженных полимеров, а также пленки ОУНТ. Введение ОУНТ в состав полимера приводит к увеличению люминисценции и, следовательно, увеличению квантового выхода [4.302]. Такой эффект наблюдается только для небольших концентраций ОУНТ в композите, а при достижении критической концентрации (1% по отношению к массе полимера) люминисценция начинает уменьшаться. Пленки ОУНТ используют в качестве прозрачных электродов в органических светодиодах, и их характеристики сравнимы с характерис-

тиками электродов из оксида индия, легированного оловом. Подробнее прозрачные проводящие покрытия рассмотрены ниже.

Прозрачные проводящие покрытия. Многие современные оптоэлектронные устройства, такие как дисплеи, сенсорные экраны, светодиоды и солнечные батареи, нуждаются в специальных материалах, обладающих низким поверхностным сопротивлением и высокой прозрачностью. Сегодня в большей части этих устройств используют прозрачные проводящие покрытия на основе полупроводниковых материалов. Наиболее широко используется оксид индия, легированный оловом (indium-tin oxide, ITO, около 90% In_2O_3 и 10% SnO_2), поверхностное сопротивление которого достигает 10 Ом/квадрат при прозрачности 90% на стекле и примерно 60–300 Ом/квадрат на лавсане (полиэтилентерефталате) [4.303] (Рисунок 4.25). ITO обладает существенными недостатками: мировые запасы индия ограничены и цена на него нестабильна, технологический процесс его обработки сложен, прозрачные проводники на основе индия являются хрупкими и, следовательно, их применение в гибкой и эластичной электронике ограничено [4.304]. В качестве альтернативных материалов для прозрачных покрытий можно использовать углеродные наноматериалы (графен [4.305, 4.308] и УНТ [4.252, 4.309]), металлические нанопроволоки (например, серебряные (AgNWs) [4.310] и медные (CuNWs)), металлические сеточки [4.311], проводящие полимеры (например, PEDOT:PSS). По прогнозу Displaybank, к 2017 году 34% всех прозрачных проводящих покрытий будут изготовлены на основе альтернативных материалов.

Пленки ОУНТ могут заменить оксид индия в прозрачных проводящих покрытиях будущего. Они не только обладают замечательной проводимостью при прозрачности 90%, но и не теряют проводимость даже при многочисленных циклах сгибания-разгибания [4.317]. Более того, они обладают нейтральным цветом, в то время как покрытия на основе ITO имеют желтоватый оттенок. Наконец, углерод является одним из самых распространенных элементов на Земле, и цена прозрачных проводящих покрытий на основе ОУНТ может быть значительно ниже, чем цена покрытий на основе ITO и других проводящих оксидов.



а — Сравнение различных УНТ, предложенных для использования в прозрачных проводящих покрытиях (поверхностное сопротивление по оси абсцисс, пропускание в видимом диапазоне по оси ординат). Заштрихованным овалом представлены оптоэлектрические характеристики коммерческих пленок ITO на лавсане. Данные об оптоэлектрических свойствах УНТ получены из источников [4.252, 4.312–4.316]. Изображение адаптировано с разрешения издателя из [4.313]. Авторские права American Chemical Society, 2011; б — Прозрачное проводящее покрытие на основе УНТ на гибкой лавсановой подложке, произведенное компанией Unidym (подразделение компании Wisepower Corporation). Источник [4.313]

Рисунок 4.25 — Различные ОУНТ.

Электроды фотоэлементов. Прозрачный электрод является критическим компонентом фотоэлементов. Существуют работы по использованию покрытий на основе ОУНТ в органических фотоэлементах, сенсибилизированных красителем фотоэлементах [4.318], и в кремниевых фотоэлементах на гетеропереходах [4.291]. Электроды на основе УНТ имеют множество преимуществ: технологический процесс их производства может быть реализован по рулонной технологии, они являются гибкими, в отличие от электродов на основе ITO, они обладают большей прозрачностью в ИК-диапазоне, следовательно, фотоэлементы с такими электродами могут преобразовывать и излучение видимого диапазона, и ИК-излучение, УНТ-электроды являются пористыми, что способствует скоплению носителей зарядов на стороне электрода.

В органических фотоэлементах использование прозрачных проводящих пленок на основе УНТ особенно привле-

кательно за счет высокой (4.7–5.2 эВ) работы выхода. Органические фотоэлементы с ОУНТ описаны в работах [4.319, 4.320].

Сенсорные панели. Сегодня сенсорные панели стали одним из основных способов взаимодействия человека с электронными устройствами. Сенсорными панелями оснащены смартфоны, планшетные компьютеры, цифровые фотокамеры, ноутбуки и игровые консоли. Спрос на сенсорные панели ежегодно растет, и, по данным прогноза iSuppli, в 2016 году их поставки достигнут 2,8 миллиардов единиц. Сенсорные панели являются областью, в которой промышленное производство и применение УНТ существует уже сейчас. Так, в октябре 2013 года компания Canatu запустила промышленное производство прозрачных проводящих покрытий и сенсорных панелей на основе ОУНТ в Финляндии. Китайская компания Foxconn Electronics, являющаяся одним из лидеров по производству электроники в мире, выкупила несколько патентов, касающихся использования УНТ, у Университета Цинхуа и дочерней компании Tsinghua-Foxconn Nanotechnology Research Center.

Коммерциализация устройств с использованием ОУНТ

ОУНТ являются многообещающим материалом. Они обладают уникальными оптическими, электрическими и механическими свойствами и, к тому же, имеют большую площадь поверхности и высокое отношение длины к диаметру. Их хиральность определяет их электрические свойства, что делает возможным получение металлических или полупроводниковых УНТ; у полупроводниковых ОУНТ ширина запрещенной зоны варьируется в зависимости от их диаметра. В ОУНТ был продемонстрирован баллистический транспорт, то есть перенос электронов без рассеяния, они демонстрируют высокую мобильность носителей заряда и могут быть легированы различными добавками для точной настройки их оптоэлектронных свойств.

Описанные ранее применения ОУНТ, а также их применения в смежных областях (например, в области хранения энергии), можно рассматривать в соответствии с требованиями

к упорядоченности и количеству используемых ОУНТ. Применения, не требующие высокой упорядоченности, например, композиционные материалы и батареи, были коммерциализированы в первую очередь. Прозрачные проводящие покрытия на основе ОУНТ сейчас вступили в стадию коммерциализации, и уже запущено производство проводящих пленок большого размера. На другом конце спектра применений ОУНТ находятся устройства, требующие использования индивидуальных нанотрубок с точно определенными свойствами. Такие устройства сегодня находятся в стадии разработки, и их производство пока не налажено.

Успешная коммерциализация устройств на основе УНТ зависит от возможностей производителей обеспечить достаточное предложение нанотрубок требуемого качества. Большая часть крупнейших производителей УНТ сосредоточена в странах Азии (КНР, Япония и Республика Корея), а в Бельгии расположен другой крупный игрок — компания Nanocyl. В Северной Америке выделяется Hyperion Catalysis с производственной мощностью до 10 тонн в год. В России главным производителем однослойных углеродных нанотрубок является компания OCSiAl, расположенная в Академгородке г. Новосибирска. Мощность производства компании составляет до 10 тонн в год, что делает OCSiAl одним из мировых лидеров. В 2017 году мощность производства OCSiAl планируется увеличить до 50 тонн в год. Полная характеризация ОУНТ производства компании OCSiAl приведена в работе [4.321]. Также в России существуют и крупные производители МУНТ: компания «НаноТехЦентр» (г. Тамбов) и Институт Катализа им. Борескова СО РАН (г. Новосибирск). Эти компании могут производить до 2 тонн МУНТ в год.

Стоит отметить, что большая часть производства УНТ осуществляется по заказу, а не в постоянном режиме. Связано это, прежде всего, с большими флуктуациями спроса, обусловленными поиском новых применений материала, а также высокими ценами на углеродные нанотрубки.

Внедрение ОУНТ в оптоэлектронные и фотонные устройства на сегодняшний день ограничено многими нерешенными исследовательскими и техническими задачами. Ключевые проблемы можно разделить на несколько групп:

- теоретические исследование и моделирование;
- проблемы синтеза;
- масштабирование технологических процессов;
- оптимизация оптоэлектронных свойств.

В области теоретических исследований и моделирования особенно выделяется проблема недостаточного понимания факторов, влияющих на свойства синтезируемых нанотрубок и на характеристики устройств на основе ОУНТ. Существует задача создания моделей, которая позволили бы связывать параметры производственного процесса со свойствами полученных ОУНТ. Помимо этого, необходимо более глубокое понимание взаимодействия индивидуальных ОУНТ друг с другом, а также появления и поведения пучков. Существует и ряд недостаточно освещенных в литературе вопросов, связанных с процессом синтеза. К таким вопросам можно отнести исследование кинетики процесса синтеза, изучение процесса зарождения ОУНТ в различных методах синтеза, а также сопоставление внешних факторов (таких как влажность, атмосферное давление и т. д.) свойствам получаемых в ходе синтеза ОУНТ. Другая теоретическая задача, связанная с синтезом,— объединение информации о влиянии катализаторов на структуру и свойства получаемых ОУНТ, и, возможно, построение теоретических моделей, описывающих зависимость свойств нанотрубок от метода синтеза и используемого катализатора. Наличие таких моделей и понимание влияния этих факторов позволит контролировать процесс синтеза и получать трубки с заранее заданными свойствами. Это является необходимым условием для успешного процесса масштабирования синтеза ОУНТ и перехода от лабораторных процессов к промышленным.

Ранее мы описали некоторые методы синтеза ОУНТ. Часть из этих методов уже используется в массовом производстве. Однако, нерешенные проблемы, связанные с синтезом ОУНТ, остаются и по сей день. К ним можно отнести низкую производительность некоторых методов, высокую вариацию в свойствах и качестве производимых ОУНТ, невозможность получения трубок с определенной хиральностью или хотя бы металличностью, сложность контроля производственного процесса (*in situ* диагностики). Решение этих проблем станет важным этапом развития производства ОУНТ и устройств на

их основе и позволит уменьшить стоимость производства и вариабельность свойств продукции.

Масштабирование процесса производства новых материалов всегда является существенным барьером для их коммерциализации. Во-первых, многие фотонные и оптоэлектронные устройства на основе ОУНТ требуют применения одиночных нанотрубок, а процесс изолирования и размещения индивидуальных нанотрубок в устройствах достаточно сложен и не автоматизирован. Во-вторых, многие применения требуют использования монохиральных ОУНТ, то есть ОУНТ с заранее заданными свойствами (индексами (n, m)). Сегодня для разделения ОУНТ по хиральностям используют в основном центрифугирование в градиенте плотности [4.245, 4.322, 4.323] или хроматографию [4.244, 4.277, 4.324, 4.325]. Использование этих методов разделения часто приводит к ухудшению свойств ОУНТ, так как происходит их диспергирование в жидкости или геле и их модификация с помощью поверхностно-активных веществ. Одной из прорывных для коммерческого применения ОУНТ технологий станет разделение нанотрубок в процессе синтеза или селективный синтез нанотрубок определенных диаметров и хиральностей.

Оптоэлектронные свойства пленок ОУНТ, производимых в настоящее время, все еще далеки от оптимальных значений, и измеренные экспериментально свойства могут существенно отличаться от предсказанных теоретически. Было показано, что минимальное теоретически возможное сопротивление пленки из ориентированных случайным образом ОУНТ составляет 80 Ом/квадрат при светопропускании 90% (на длине волны 550 нм), а после легирования — 25 Ом/квадрат [4.326]. Несмотря на то, что перспективы ОУНТ в качестве прозрачных проводящих проводников привлекательны, им пока сложно соперничать с традиционно используемым ITO, сопротивление которого составляет приблизительно 10 Ом/квадрат при прозрачности 90%.

МУНТ уже пользуются коммерческим успехом на рынке в качестве добавок для батарей и композиционных материалов. При этом ОУНТ и электронные устройства на их основе только выходят на рынок. Связано это, прежде всего, с тем, что ОУНТ находятся на более ранней стадии цикла исследований и разработки. Перечисленные выше ключевые пробле-

мы и нерешенные задачи, конечно, ограничивают применение ОУНТ, но над синтезом и применением ОУНТ работают многочисленные научные группы по всему миру, и большая часть проблем будет разрешена в ближайшее время.

4.6. Спектрально-прецизионные лазеры

4.6.1. Введение

Использование монохроматического излучения принципиально важно во многих областях науки и технологии. Его селективное по длине волны (спектрально-селективное) воздействие [4.327–4.329] обусловлено наличием резонансного отклика облучаемого вещества на атомарно-молекулярном уровне. Эффективность такого воздействия зависит от ряда параметров лазерного излучения, в числе которых степень монохроматичности (насколько узкой является линия излучения лазера), возможность плавной спектральной перестройки длины волны, мощность, уровень амплитудных и фазовых шумов. Лазеры с оптимальным сочетанием этих параметров излучения широко применяются для решения научных и прикладных задач, связанных с охлаждением и пленением атомов и молекул [4.330–4.332], разделением изотопов [4.333–4.335], детектированием веществ [4.336, 4.337], атомной литографией [4.332, 4.338], оптической метрологией [4.339], когерентной волоконно-оптической передачей информации [4.340, 4.341], голографией [4.342], интерферометрией [4.343] и другими [4.344]. Спектрально-прецизионные лазеры характеризуются высокой стабильностью частоты генерации и, в некоторых случаях, возможностью ее изменения в относительно широком спектральном диапазоне. Другими словами, стабильность длины волны излучения таких лазеров сочетается с возможностью ее перестройки.

Охлаждение и локализация атомов и молекул являются одними из наиболее ярких применений спектрально-прецизионных лазеров. Возможности управления движением единичных атомов или их ансамблей с помощью излучения открывают новые области науки и технологий, такие как атомная нанолитография [4.345], атомные

часы [4.346], атомные чипы [4.347] и другие. Некоторые из этих областей, например, атомные часы, находятся в настоящее время на относительно высоком прикладном уровне и используются в метрологических целях во многих странах мира, включая Россию. Атомные часы на основе ультрахолодных атомов стронция являются наиболее стабильным современным стандартом частоты и времени [4.348].

Спектрально-прецизионные лазеры являются локомотивом развития многих направлений передовых научных исследований и высоких технологий, в рамках которых решаются актуальные научно-технические проблемы. В числе результатов решения этих проблем:

- создание ультра-стабильных оптических стандартов частоты [4.348–4.350];
- повышение точности систем навигации (ГЛОНАСС и другие) [4.351];
- увеличение чувствительности квантовых магнитометров для расширения их применений в системах безопасности, в биомедицине, в спутниковых системах, для обнаружения полезных ископаемых;
- увеличение скорости передачи информации в действующих системах связи [4.352];
- получение редких изотопов химических элементов, используемых во многих областях человеческой деятельности [4.353];
- улучшение углового разрешения крупных наземных телескопов с помощью систем адаптивной оптики и созданных с помощью спектрально-прецизионных лазеров «искусственных звезд» в верхних слоях атмосферы [4.354];
- применение голограмм для науки, техники и промышленности;
- разработка интерферометрических методов измерений и неразрушающего контроля деформаций, амплитуд вибраций;
- создание источников излучения среднего ИК диапазона, в том числе с перестройкой длины волны излучения [4.355];
- создание источников ТГц излучения, в том числе с перестройкой частоты излучения [4.356].

Способность спектрально-прецизионных лазеров концентрировать относительно высокую мощность излучения в чрезвычайно малом спектральном интервале позволяет применять эти лазеры в тех приложениях, где важна монохроматичность излучения (или большая длина когерентности излучения) на заданной длине волны. Параметры спектрально-прецизионных лазеров в значительной степени влияют на оптическую метрологию, на атомную оптику, на технологии детектирования веществ.

Отсутствие общепринятого количественного определения в каком именно спектральном интервале должна быть сконцентрирована мощность излучения спектрально-прецизионного лазера обусловлено тем, что под узкой линией излучения в разных приложениях могут подразумеваться разные величины. При резонансном взаимодействии лазерного излучения с атомами разреженного газа требование к ширине линии излучения зачастую определяется естественной шириной спектральной линии изолированной квантовой системы, составляющей в видимом и УФ-диапазонах спектра для разрешенных правилами отбора переходов ~10 МГц. Сконцентрировать мощность излучения лазера в спектральной области шириной менее 10 МГц можно либо в случае генерации лазера на одной продольной моде резонатора (на одной частоте) или в случае генерации лазера на нескольких частотах в спектральной области шириной 10 МГц (при оптической длине резонатора лазера более 15 м). Как правило, в качестве спектрально-прецизионных лазеров используются одночастотные лазеры, характеризующиеся также низким уровнем амплитудных и фазовых шумов. Ширина линии излучения многих одночастотных лазеров в диапазоне 1–10 МГц обеспечивается без применения систем активного сужения линии генерации (систем стабилизации частоты лазера). Для переходов с метастабильных уровней естественная ширина линий не превышает нескольких сотен герц и концентрации мощности излучения спектрально-прецизионного лазера в таком ультра-узком спектральном интервале требует применения систем активной стабилизации частоты, позволяющих сузить линию излучения лазера до величин вплоть до 1 Гц.

С другой стороны, требуемая спектральная селективность воздействия лазерного излучения на твердотельные системы

существенно ниже, например, минимальная ширина линий поглощения в одиночных квантовых точках в видимом диапазоне спектра может составлять 0,05–0, мэВ (0,4–0,8 $см^{-1}$), что соответствует 12,1–24,2 ГГц. В этом случае «одночастотным» лазером для задач взаимодействия лазерного излучения с квантовыми точками может служить лазер с шириной линии, например, 1 ГГц.

Таким образом, конкретные требования к ширине линии излучения спектрально-прецизионного лазера определяются приложением и в зависимости от приложения требуемая степень монохроматичности излучения спектрально-прецизионного лазера может отличаться на несколько порядков.

4.6.2. Основные направления исследований и их применений

Исследования в области спектрально-прецизионных лазеров развиваются в следующих основных направлениях:

- разработка новых более совершенных схем генерации узкополосного излучения с заданной длиной волны;
- получение генерации на новых длинах волн с использованием существующих и новых оптических материалов, в том числе новых активных лазерных сред;
- разработка новых методов управления длиной волны узкополосного лазерного излучения, сужения линии, обеспечения кратковременной и долговременной стабильности длины волны, повышения мощности;
- поиск и исследование новых физических эффектов и явлений, перспективных для создания более совершенных спектрально-прецизионных лазеров и приборов на их основе.

Области применений результатов этих исследований связаны в первую очередь с задачами, которые требуют резонансного взаимодействия узкополосного лазерного излучения с атомами или молекулами разреженного газа или требуют относительно высокой степени когерентности излучения. Традиционные области применения включают оптическую метрологию, глобальные системы позиционирования, когерентные системы оптической связи, системы

для разделения, анализа и детектирования веществ, создание источников излучения среднего ИК-диапазона и ТГц излучения методами нелинейной оптики, голографические и интерферометрические технологии и другие передовые научные исследования. В последние годы спектрально-прецизионные лазеры активно используются в исследованиях и разработках в области квантовой обработки информации [4.357]. Одночастотные лазеры востребованы в системах многоканального когерентного сложения лазерных пучков для достижения высокой мощности излучения, не реализуемой в одноканальной лазерной системе [4.358]. Также одночастотные лазеры имеют преимущество в тех областях применений, где требуется низкая интенсивность амплитудных и фазовых шумов излучения. Многочастотные лазеры характеризуются существенно более высоким уровнем амплитудных и фазовых шумов благодаря биениям мод излучения.

В отдельный класс спектрально-прецизионных лазеров можно выделить источники излучения метрологического назначения — частотно-стабилизированные лазеры с нормированными метрологическими характеристиками. Такие лазеры позволяют осуществлять прецизионные измерения в микроэлектронике, оптической метрологии, сенсорных системах.

Одночастотные лазеры востребованы в методах нелинейного спектрального преобразования непрерывного излучения с помощью высокодобротных резонаторов, когда для эффективной параметрической генерации излучения длина высокодобротного резонатора должна быть согласована с частотой входного излучения [4.359, 4.360]. При этом ширина линии входного излучения должна быть как минимум в несколько раз меньше ширины пика пропускания высокодобротного резонатора, составляющей, как правило, не более нескольких МГц [4.361].

Развивается область применения одночастотных лазеров в различных технологиях дистанционного зондирования [4.362].

Одночастотное лазерное излучение, одночастотное лазерное излучение с перестройкой частоты и одночастотное лазерное излучение с управляемой шириной линии излучения (с управляемой длиной когерентности) используется

в оптической томографии на основе детектирования рассеянного от зондируемой среды оптического спекл-поля и определения оптической неоднородности [4.363, 4.364].

4.6.3. Барьеры развития — научные и технологические

Спектрально-прецизионные лазеры реализуются на основе различных типов генераторов когерентного излучения, в число которых входят полупроводниковые, твердотельные (включая волоконные), жидкостные, газовые и другие лазеры. Часть проблем имеет общий характер для всех типов спектрально-прецизионных лазеров, часть связана со спецификой базового типа лазера. К общим проблемам относятся, например, следующие:

- сложность обеспечения долговременной стабильности частоты излучения лазера на произвольной частоте излучения [4.365, 4.366];
- сложность осуществления плавной перестройки частоты генерации во всем рабочем спектральном диапазоне [4.367, 4.368];
- отсутствие высокостабильных реперов частоты с возможностью перестройки реперной точки в широком спектральном диапазоне.

Специфичной проблемой полупроводниковых лазеров является возможность получения излучения только в определенных спектральных диапазонах [4.369]. Аналогичная проблема существует для волоконных лазеров в силу ограниченной номенклатуры активных сред [4.370].

Одна из проблем — обеспечение долговременной стабильности частоты излучения спектрально-прецизионного лазера в случае, когда частота его излучения не совпадает с частотой перехода естественного репера — атомного или молекулярного спектрального резонанса. В этом случае долговременная стабильность частоты излучения спектрально-прецизионного лазера может обеспечиваться, например, привязкой его частоты к частоте другого более стабильного спектрально-прецизионного лазера через вспомогательный оптический резонатор или через гребенку частот оптического комб-генератора. Перенос долговременной стабильности

частоты генерации от одного спектрально-прецизионного лазера к другому до сих пор является исследовательской задачей, особенно сложной в случае, когда другим спектрально-прецизионным лазером является лазер, частота излучения которого должна перестраиваться в относительно широком диапазоне. Для обеспечения долговременной стабильности частоты излучения спектрально-прецизионного лазера с фиксированной частотой излучения в последнее время эффективно применяются высокодобротные резонаторы, изготовленные из специального стекла с ультранизким коэффициентом температурного расширения, используемые в вакууме при температуре нулевого температурного расширения. Минусом этих искусственных реперов является фиксированное спектральное положение их реперных точек. Спектральное положение реперных точек можно было бы изменять, например, варьированием температуры высокодобротного резонатора, однако при этом будет ухудшаться долговременная стабильность такого репера. Кроме того, температурная перестройка спектрального положения реперной точки относительно медленна.

В числе важнейших научных проблем спектрально-прецизионных лазеров с широкодиапазонной перестройкой длины волны излучения — проблема выделения одной частоты (или узкой линии) излучения из широкого спектра излучения лазера и управление спектральным положением этой частоты/линии. Решением этой проблемы мог бы быть спектрально-селективный элемент с ультра-узкой полосой пропускания/отражения, положение которой можно было бы изменять с произвольной скоростью электрическим сигналом. Существующие селекторы длин волн излучения спектрально-прецизионных перестраиваемых лазеров пока не обеспечивают такую возможность.

Технологические проблемы в значительной мере влияют на развитие полупроводниковых лазеров, в частности на развитие спектрально-прецизионных лазеров на основе квантоворазмерных структур. Технологии изготовления этих структур и контроля их параметров является относительно сложными и в дальнейшем, например, при внедрении квантоворазмерных структур в фотонные интегральные схемы эти технологии будут еще усложняться.

Кроме научных и технологических барьеров развития спектрально-прецизионных лазеров, в России существуют также институциональные барьеры, связанные с тем, что лазерные технологии не входят в Перечень критических технологий Российской Федерации [4.371].

4.6.4. Перспективы коммерциализации

Новые технологии будут выходить на рынок как в виде новых более совершенных спектрально-прецизионных лазеров, так и в виде новых устройств и методов использования спектрально-прецизионных лазеров. В числе ожидаемых новых технологий:

- более совершенные схемы генерации узкополосного излучения с заданной длиной волны. Для реализации таких схем могут быть применены новые методы сужения линии генерации перестраиваемых лазеров или новые активные среды, обеспечивающие генерацию на требуемых длинах волн излучения. На временно́м горизонте 3–5 лет можно ожидать начала производства в России вертикально-излучающих полупроводниковых лазеров с длинами волн 795, 895 нм для атомных часов [4.372, 4.373]. Традиционные широко-перестраиваемые по длине волны излучения лазеры будут становиться все более и более автоматизированными [4.374, 4.375], к 2025 г. на рынке ожидается преобладание перестраиваемых лазеров с узкой линией излучения, не требующих ручной настройки и/или ручного управления [4.376];
- более эффективные методы нелинейной оптики для генерации излучения на новых длинах волн с использованием существующих и новых оптических материалов [4.377]. На временно́м горизонте 3–5 лет можно ожидать интенсивного развития узкополосных источников перестраиваемого излучения среднего ИК диапазона спектра [4.378];
- создание спектрально-прецизионных лазеров в формате фотонных интегральных схем [4.379] (временной горизонт 3–5 лет);
- создание высокостабильных реперов частоты с возможностью перестройки реперной точки в широком спект-

ральном диапазоне и обеспечение на их основе долговременной стабильности частоты излучения лазера на произвольной частоте излучения (временно́й горизонт 5–10 лет).

Развитие новых технологий спектрально-прецизионных лазеров зависит также от прогресса в областях применений этих лазеров и от скорости и широты коммерческого освоения этих областей. Соответственно для разных технологий с использованием спектрально-прецизионных лазеров требуется разное время для их коммерциализации, при этом временной горизонт для некоторых передовых технологий, например, квантовых компьютеров на основе сверх-охлажденных атомов, не могут предсказать даже эксперты по этим технологиям.

Необходимо отметить, что при создании спектрально-прецизионных лазеров во многих случаях используются технологии, имеющие самостоятельные коммерческие перспективы, особенно это касается полупроводниковых структур. Например, в 2015 г. на рынке появились телевизоры и дисплеи, использующие технологию квантовых точек. В этих применениях не требуется относительно высокая спектральная прецизионность лазерного излучения, однако определенная монохроматичность излучения все-таки нужна для обеспечения качественной RGB технологии.

4.6.5. Оценки рынков

Спектрально-прецизионные лазеры относятся к высокотехнологичным лазерам, используемым как в научных и прикладных исследованиях, так и в промышленности. Спектрально-прецизионные лазеры составляют не менее 50% рынка для передовых научных исследований и присутствуют на многих других рынках лазерного оборудования, включая системы дистанционного зондирования атмосферы, системы на основе параметрического преобразования излучения в среднюю ИК область для детектирования газов, системы генерации ТГц излучения и другие. Отдельные исследования масштаба рынка спектрально-прецизионных лазеров и оборудования на их основе не проводились [4.380, 4.381]. Наиболее близким сегментом рынка к спектрально-прецизионным

лазерам является сегмент научных лазеров, который включает также импульсные лазеры с относительно широким спектром излучения. В некоторых исследованиях [4.380, 4.382] научные лазеры объединены с военными, что еще больше затрудняет выделение именно спектрально-прецизионного сегмента рынка. По данным [4.382] мировой объем продаж лазеров для научных исследований и военных применений составил 825 млн. долларов США в 2015 году и, ожидается, что он превысит 880 млн. долларов США в 2016 году.

Исходя из этого, современный мировой рынок спектрально-прецизионных лазеров можно оценить в 150–250 млн. долларов США.

5. Информация: передача, обработка, хранение и защита

С ПРАКТИЧЕСКИ полным исчерпанием ресурсов и возможностей традиционных технологий (кабельной и радиосвязи, запоминающих устройств различного типа и пр.) становится очевидным, что для дальнейшего развития требуется освоение принципиально новых подходов, одним из которых и, вероятно, наиболее перспективным может стать фотоника.

В настоящее время переход на технологии, основанные на использовании фотоники, является одним из основных трендов в современных коммуникациях и высокопроизводительных вычислениях. Во всем мире в развитие методов хранения, защиты и передачи информации вкладываются большие ресурсы.

Научное направление, занимающееся квантовой передачей информации, возникло на стыке нескольких областей знания. К ним относятся фотоника, квантовая физика, информатика, теория информации и криптография. Все задачи, рассматриваемые этим направлением, можно разбить на две тесно связанные категории: квантовую коммуникацию и квантовые вычисления.

В данном обзоре описаны условно-традиционные подходы, раскрывающие перспективные возможности «проводной» передачи информации и качественно новые технологии, основанных на принципах квантовой обработки данных.

Кроме того, подраздел 5.3 посвящен проблемам и технологиям хранения информации.

5.1. Волоконные оптические линии связи

5.1.1. Введение

Растущие потоки данных и, соответственно, требования к пропускной способности коммуникационных линий, возникают по всему земному шару — феномен, который определил ускоренное развитие общества в XXI столетии [5.1]. Всемирная коммуникационная сеть играет роль глобальной «нервной системы», когда происходящее где-либо практически мгновенно становится известным повсюду и вызывает почти мгновенную реакцию. Социальная динамика такого Глобального Информационного Общества (ГИО) существенно отличается от привычной. Также следует отметить, что уровень информатизации общества обеспечивает конкурентоспособность и, следовательно, безопасность страны.

Среди наиболее заметных последствий формирования ГИО следует отметить создание новой высокотехнологичной фотонной индустрии, способной стать локомотивом экономического развития для многих отраслей (мультипликативный эффект).

Наряду с технологиями баз данных и суперкомпьютеров, волоконно-оптические системы связи формируют триаду базовых фотонных технологий. С 1993 по настоящее время в мире проложено более 2,2 млрд. км оптического волокна, по которым происходит более 80% глобального информационного обмена. С распространением облачных технологий, сетевых вычислений и распределенных баз данных роль волоконно-оптических систем связи особенно возрастает [5.1].

Основной характеристикой волоконно-оптической системы связи является ее пропускная способность. Проблема увеличения пропускной способности в высшей степени актуальна в связи с опережающим ростом информационных потоков. К тому же, ранее проложенные линии, оказываются не оптимальными для более современных технологий, например, для когерентных форматов модуляции.

Расстояние, на которое должна быть передана информация по волоконно-оптическим сетям, диктуется конкретной задачей: от нескольких микрон для фотонных чипов до не-

скольких тысяч километров для магистральных линий между городами и странами. Общим правилом является обратная зависимость между расстоянием, на которое нужно передать сигнал и максимально возможной пропускной способностью линии. Поэтому качество магистральных линий связи часто характеризуют «пропускной способностью, умноженной на максимальную дистанцию распространения сигнала».

Отличительной особенностью России являются огромные территории с достаточно малой плотностью населения. В отличие от Европы, где среднее расстояние между городами составляет менее сотни километров, в России такие расстояния составляют порядка нескольких сотен километров в западной и зачастую более тысячи километров в восточной части страны. В силу этого для России более актуальной является задача обеспечения распространения информационного сигнала на более длинные расстояния при меньшей плотности информации. В Европе ситуация обратная. Таким образом, при оптимизации систем волоконно-оптической связи не все технологические решения могут быть применены напрямую, без адаптации к местным условиям.

В первом приближении решаемые в данной области технологий проблемы можно сформулировать так «передача сверхплотных потоков информации на масштабах от микрометров до нескольких тысяч километров». Такие задачи возникают в области мобильной связи и интернета, обмена информацией в вычислительных устройствах, включая распределенные вычислительные кластеры, обеспечения информационных потоков внутри зданий, летательных аппаратов, отдельных комплексов (например, в задачах информационного обеспечения театра военных действий), информационного обмена в рамках распределенных сенсорных сетей; информационных потоков при мониторинге в реальном времени (например, передачи информации со спутников при мониторинге поверхности земли), информационного обмена по безопасным каналам связи.

В области технологии волоконно-оптических линий связи время окупаемости инноваций составляет всего несколько лет и достаточно мало по сравнению с другими высокотехнологичными секторами. Это делает волоконно-оптические линии связи привлекательными

для инвесторов, а мультипликативный эффект стимулирует развитие широкого спектра смежных областей. Перечислим их. Это полупроводниковые лазеры и сопутствующие технологии упаковки и сопряжения с волокнами, низкочастотная и высокочастотная электроника с требуемыми стандартами размеров компонентов в десятки нанометров, высокочастотная оптоэлектроника для модулирования оптического сигнала, полный спектр пассивных оптоволоконных компонентов, производство волокон (включая легированные специальные волокна) и кабелей, технологии полимеров для покрытия волокон и кабелей, программное обеспечение. К этому необходимо добавить сопутствующие производства измерительной и калибровочной техники, применяемой как для тестирования готовой продукции, так и для обслуживания работающих линий. Функционирование всей производственной и эксплуатационной цепочки требует развитой финансовой структуры, что в свою очередь стимулирует развитие соответствующих сегментов финансового сектора. Не следует забывать и о проблемах информационной безопасности, которая может быть обеспечена в полном объеме лишь на отечественных технологиях, особенно в государственном секторе.

5.1.2. Основные направления исследований и их применений

Основными направлениями исследований в области волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) являются:

- увеличение пропускной способности ВОЛС;
- увеличение безрегенерационной дальности ВОЛС;
- оптимизация топологии и пропускной способности смешанных коммуникационных сетей;
- использование фотонных интегральных схем;
- электронно-оптические и оптоэлектронные преобразователи (интерконнекты);
- развитие методов шифрования передаваемой информации;
- замена электронно-ориентированной компонентной базы для обработки сигнала на компоненты на основе квазичастиц.

Увеличение пропускной способности ВОЛС

С конца 70-х годов прошлого века пропускная способность Волоконно-Оптических Линий Связи (ВОЛС) росла практически экспоненциально — см. Рисунок 5.1 (по данным [5.2]). Этому способствовали несколько факторов. На начальном этапе существовал огромный разрыв между реальной полосой модуляции используемых систем связи (примерно 100 Мбит/с) и потенциальной полосой пропускания волокна (порядка 100 Тбит/с). Этот разрыв в шесть порядков удалось значительно сократить за счет совершенствования электроники. Первый и принципиальный шаг был сделан при замене в передатчиках оптических систем связи светоизлучающих диодов полупроводниковыми диодными лазерами [5.3]. Быстродействие передатчиков (и соответственно приемников) продолжает увеличиваться, однако прогресс в этой области замедлился, так как возможности высокочастотной электроники ограничены фундаментальными физическими законами. Большой прогресс обеспечила технология плотного спектрального мультиплексирования (Dense Wavelength Division Multiplexing — DWDM), когда по одному волокну передается большое число каналов на разных длинах волн (в настоящее время в стандартном спектральном окне передается порядка ста каналов в зависимости от формата модуляции).

Пропускная способность систем дальней связи начиная с середины 70-х годов примерно 30 лет росла экспоненциально. Прогресс достигался за счет уменьшения дисперсии в волокне, использования все более высокоскоростной электроники, применения оптических усилителей на основе допирования эрбием (Erbium Doped Fiber Amplifier — EDFA) в сочетании со спектральным мультиплексированием (технология WDM) и, наконец, за счет использования спектрально эффективных форматов модуляции. Реализовать такие форматы в оптических системах связи позволило внедрение когерентного детектирования с цифровой обработкой сигналов (Digital Signal Processing (DSP) based coherent detection) [5.2].

Как видно из Рисунка 5.1, к 2000 году возможности увеличения пропускной способности традиционных оптических систем связи были в значительной степени исчерпаны.

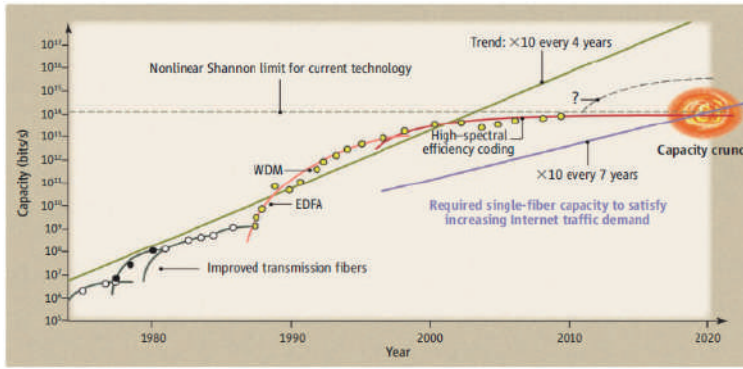


Рисунок 5.1 — Развитие систем дальней связи

Дальнейший прогресс в увеличении производительности основан на внедрении и совершенствовании спектрально эффективных форматов модуляции в сочетании с когерентным детектированием и цифровой обработкой сигналов (Digital Signal Processing — DSP).

Рисунок 5.1 выявляет очевидную тенденцию к прекращению экспоненциального роста скорости передачи информации в системах дальней связи. Если при этом сохранится экспоненциальный рост интернет-трафика (увеличивающийся приблизительно в 10 раз каждые 7 лет), то примерно к 2020 году возникнет дефицит пропускной способности сетей связи (так называемый «capacity crunch»). Разумеется, эту цифру надо воспринимать не буквально; осуществление прогноза будет зависеть от многих факторов, в том числе, разумеется, и от страны, где проложены линии связи. Тем не менее, тенденция вполне очевидна и рано или поздно затронет всех пользователей интернета, то есть по сути весь мир. А это будет иметь глобальные социальные, экономические и политические последствия.

Таким образом, в оптических системах дальней связи жизненно необходимо внедрение новых физических идей и принципов, с использованием которых будут созданы прорывные технологии следующего поколения. В настоящий момент такими критическими технологиями являются:

- квадратурное и поляризационное мультиплексирование;
- многоуровневые форматы модуляции;
- увеличение символьной скорости передатчиков и приемников;
- методы спектрального мультиплексирования;
- методы пространственного мультиплексирования: многосердцевинные и маломодовые волокна, вортексы;
- суперканалы, спектральная инженерия и программно перестраиваемые сети;
- совершенствование методов обработки сигналов в когерентных системах связи;
- компенсация искажений при цифровой обработке сигналов;
- развитие алгоритмов коррекции ошибок.

Квадратурное и поляризационное мультиплексирование. Использование когерентных форматов модуляции есть необходимая составная часть современных линий связи. На смену системам с модуляцией мощности (On Off Key — OOK), работающими на частоте повторения 10 Гбит/сек, приходят когерентные форматы модуляции с битовыми скоростями 40 и 100 Гбит/сек [5.4–5.6]. Когерентные системы связи позволяют использовать все четыре степени свободы электромагнитного поля: амплитуду и фазу (или две квадратуры) в каждой из двух поляризаций. Это позволяет в формате DP-QPSK (Dual Polarization — Quater Phase Shift Keying) передавать 4 бита на каждый символ, используя всего один уровень мощности [5.7] (см. Рисунок 5.2). Такие системы позволяют увеличить скорость передачи информации без увеличения символьной скорости, то есть не требуют изменения принятой в настоящее время 50 ГГц сетки в мультиплексировании по длинам волн.

Сигнал содержит две информационные компоненты в формате QPSK на ортогональных поляризациях (поляризационное мультиплексирование, слева). Для обозначения данного формата наряду с аббревиатурой DP-QPSK используется аббревиатура PM-QPSK, то есть поляризационно-мультиплексированный QPSK. В свою очередь, каждый из двух ортогонально поляризованных сигналов в формате QPSK можно представить как объединение

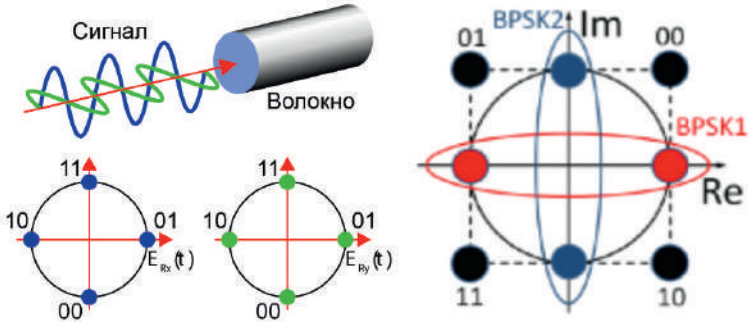


Рисунок 5.2 — Структура оптического сигнала в формате DP-QPSK.

Источник: [5.7]

двух бинарных фазовых сигналов BPSK, сдвинутых по фазе на π/2 (справа).

В когерентных приемниках используются довольно сложные алгоритмы обработки сигнала, которые осуществляются специальным чипом DSP — Digital Signal Processing (цифровая обработка сигнала), восстанавливающим информацию после детектирования.

Такой способ модуляции имеет несомненные преимущества, в частности позволяет увеличить как емкость информационного потока, так и максимальную длину его распространения. Для переключения с не когерентного режима работы на когерентный необходима замена приемопередающей аппаратуры, при этом все остальное оборудование (волокна, усилители и т. п.) остается прежним. Этим обусловлен достаточно быстрый и массовый переход к когерентному режиму в уже инсталлированных и работающих линиях связи.

Выполненный в работе [5.8] анализ показывает, что появление технологии DP-QPSK со скоростью передачи сигнала 100 Гбит/с в полосе 50 ГГц стало переломной точкой в развитии магистральных ВОЛС. До ее появления рост скорости в линии связи происходил с сохранением полосы (2,5G, 10G, 40G, 100G — все в сетке 50 ГГц) и с сохранением дальности передачи. Соответственно росла и производительность систем.

Однако с появлением систем 100G тенденции изменились — в системах 100G с когерентным приемом была достиг-

нута предельная эффективность использования независимых параметров светового излучения (фазы и поляризации). Также к моменту появления систем 100G был практически достигнут предел символьной скорости передачи, определяемый физическими характеристиками электронных устройств.

Многоуровневые форматы модуляции. Дальнейшее развитие волоконно-оптических систем связи, как это видно по тенденциям 2014–2015 годов, будет основано на использовании более сложных форматов модуляции (DP-16QAM, DP-64QAM и др.) [5.9]. Эти форматы позволяют существенно повысить спектральную эффективность и, соответственно, скорость в привычной для оператора ширине полосы. Исследования все более сложных форматов интенсивно проводятся многими компаниями. Сообщается о ведущихся экспериментах с форматами 128QAM и даже 256QAM. Такие форматы дают заметный выигрыш в скорости передачи информации для коротких линий при фиксированной полосе. Выигрыш в скорости достигается за счет большей информационной емкости: один символ в формате DP-QPSK переносит 4 бита, а в формате DP 256QAM — 16 бит. Можно прогнозировать внедрение уже в ближайшее время в городских сетях систем 200G и 400G с использованием форматов DP 16QAM. Ведутся интенсивные исследования по повышению качества сигнала, совершенствованию алгоритмов работы и внедрению форматов более высокого уровня для использования в сетях связи.

Усложнение модуляции неизбежно ведет к существенному падению дальности передачи. При этом производительность (то есть скорость передачи, умноженная на максимально достижимую длину распространения и деленная на ширину используемого оптического спектра), как видно из Рисунка 5.3, также заметно падает. Так при увеличении скорости передачи информации примерно в два раза при переходе от формата DP-QPSK к формату DP 16QAM дальность связи уменьшается в пять раз.

Не вызывает сомнений, что в обозримом будущем для магистральных ВОЛС основной останется технология 100G как обладающая рекордной производительностью и, соответственно, максимальной экономической эффективностью для протяженных линий. В то же время новые технологии

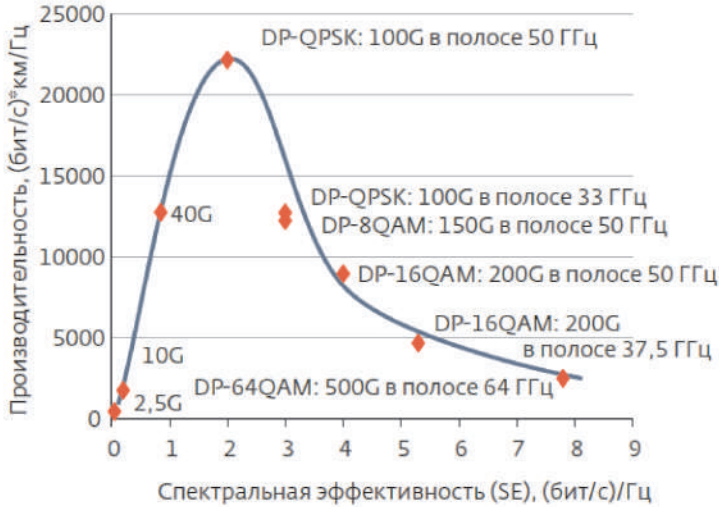


Рисунок 5.3 — Взаимосвязь производительности существующих коммерческих и лабораторных систем связи и их спектральной эффективности.

Источник: [5.9]

с «высокими» форматами модуляции дают заметный выигрыш для коротких линий, где при той же полосе позволяют достичь намного большей скорости.

Рекордная производительность систем 100G на коротких линиях не используется, а потому и не является важным для оператора фактором. Базовым параметром для коротких линий, по сути, является сама спектральная эффективность, то есть, частота повторения деленная на занимаемую ширину спектра (Spectrum Efficiency — SE); чем она больше — тем лучше. Поэтому в городских сетях можно ожидать скорого внедрения систем 200G и 400G, использующих многоуровневые форматы модуляции. Увеличение скоростей на коротких расстояниях будет продолжаться и дальше в регионах США, Европы, Китая, Японии и других стран с плотным расположением крупных городов, где потребность в увеличении скорости коротких линий очень велика.

Увеличение символьной скорости передатчиков и приемников. В транспондерах современных систем связи ис-

пользуются символьные скорости 30 и 40 Гбод, причем наиболее широкое распространение получили системы связи с символьными скоростями порядка 30 Гбод. Именно такие символьные скорости реализуются в наиболее распространенных когерентных транспондерах со скоростью передачи информации 100 Гбит/с, использующих формат DP-QPSK. Увеличение символьной скорости улучшает управляемость сети и, потенциально, может привести к сокращению расхода энергии и занимаемых оборудованием площадей (объемов) в регенерационных пунктах и узлах. Кроме того, сами потребители услуг связи ставят задачу перехода на новые канальные скорости — 400 Гбит/с и 1 Тбит/с на канал. Ожидается, что символьная скорость 60 Гбод может стать следующим шагом в развитии технологии транспондеров. Этот шаг позволит достигнуть скорости передачи информации 400 Гбит/с с использованием одной несущей (например, при использовании формата QAM16 и символьной скорости 60 Гбод). Поэтому интенсивные исследования в области разработки транспондеров с символьной скоростью 60 Гбод и больше (до 120 Гбод) проводят как производители компонент (транспондеров), так и производители систем связи (Alcatel, Huawey, ZTE) [5.10].

Основное препятствие на пути повышения символьной скорости — ограниченное быстродействие электроники. Его можно преодолеть, используя оптические технологии, в частности, технологию «спектрального склеивания» [5.11] или оптического временного мультиплексирования (технология OTDM) [5.12]. С использованием технологии OTDM достигнуты символьные скорости, значительно превышающие 100 Гбод, которые пока недоступны при использовании электронных методов. Первый эксперимент по передаче информации со скоростью 100 Гбит/с на расстояние 36 км с использованием технологии OTDM был проведен еще в 1993 году [5.13]. С того времени исследователи технологии OTDM существенно увеличили и скорость, и дальность передачи.

Однако, несмотря на демонстрацию потенциальных возможностей технологии OTDM перспективы ее практического применения столь же неопределённы, как и в 1993 году. Главный недостаток технологии OTDM и технологии «спектрального склеивания» — высокая стоимость оборудования и его уникальность.

Методы спектрального мультиплексирования. Использование незадействованных в настоящее время спектральных диапазонов может увеличить пропускную способность ВОЛС [5.14–5.17]. Современные DWDM сети дальней связи почти исключительно используют С диапазон оптического волокна (C-band, длины волны 1530–1565 нм) поскольку именно в этом спектральном диапазоне работают оптические усилители EDFA и потери света при распространении в оптическом волокне минимальны. Ширина С диапазона 35 нм или примерно 4,4 ТГц.

Спектральная область, которая могла бы быть использована для передачи информации, простирается от 1300 нм до 1700 нм (ширина полосы 400 нм). Оптические потери в таком волокне не превышают 0,4 дБ/км. Использование каждого из свободных в настоящее время спектральных диапазонов позволит в разы увеличить пропускную способность линии. Однако в настоящее время для спектральных областей 1300–1520 и 1610–1700 нм отсутствуют эффективные волоконные оптические усилители — обязательные элементы высокоскоростных волоконно-оптических систем связи и передачи информации. Поэтому задача создания эффективных усилителей для спектральных областей 1300–1520 и 1610–1700 нм является исключительно актуальной. Конечно, в этом диапазоне могут использоваться распределенные рамановские усилители (ВКР-усилители) [5.14], однако для оптимальной работы сетей дальней связи необходимо наряду с распределенными использовать и дискретные усилители, аналогичные EDFA для С- и L-диапазонов.

Практически готова к использованию в коммерческих системах связи только одна спектральная полоса — L-диапазон (1565–1630 нм). Для этой области также могут быть использованы эрбиевые усилители EDFA, однако их конструкция существенно отличается от таковой для усилителей С-диапазона. Такие усилители дали бы возможность использовать уже проложенные световоды, однако потребовали бы установку дополнительной аппаратуры. Всё же такая модернизация предпочтительнее, чем переход на многомодовые волокна или волокна со многими сердцевинами. В настоящее время поиск новых материалов легирования световодов для получения соответствующих усилителей ведется во многих

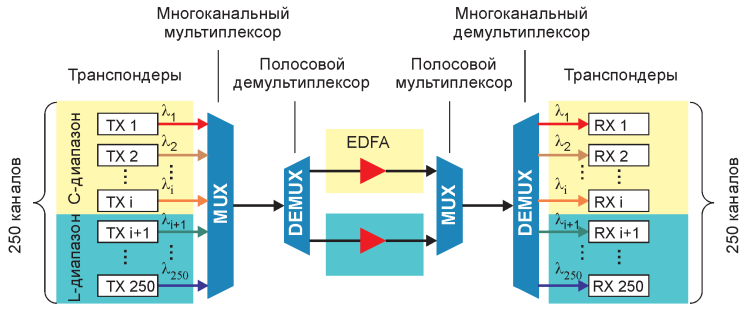


Рисунок 5.4 — Структура DWDM системы связи со скоростью 27 Тбит/с.

Источник: [5.15]

странах. Результаты исследований не так давно разработанных в России волоконно-оптических усилителей на основе волокон, легированных висмутом, для S- и O-диапазонов выглядят оптимистично [5.16, 5.17].

При условии некоторого улучшения параметров такой усилитель мог бы быть предложен для использования в ВОЛС. Другой вариант усилителя — рамановский усилитель — работает (в принципе) на любой длине волны, использует в качестве усиливающей среды сам магистральный световод, однако обладает гораздо меньшей эффективностью по сравнению с эрбиевыми. Рамановский усилитель может быть использован в световодах длиной от 20 до максимум 50–60 километров, в то время как эрбиевый может быть использован для компенсации потерь на расстояниях до 100 километров.

Недавно российской компанией Т8 продемонстрирована работа системы связи со скоростью 27 Тбит/с, использующая 270 каналов по 100 Гбит/с в C и L диапазонах, формат модуляции DP-QPSK, плотность расположения каналов 33 ГГц [5.15] — см. Рисунок 5.4.

Методы пространственного мультиплексирования: многосердцевинные и маломодовые волокна, вортексы. В настоящее время пропускная способность оптических коммуникационных линий на основе временного (TDM) и спектрального мультиплексирования (WDM) ограничена нелинейным пределом Шеннона [5.18]. Кардинально увеличить пропускную

способность волокна позволяют методы пространственного мультиплексирования, которые реализуются с использованием многосердцевинных и маломодовых волокон. Одним из вариантов пространственного мультиплексирования в маломодовых волокнах является использование мод, обладающих угловым моментом — вортексов (vortex).

Поскольку у одномодовых волокон диаметр сердцевины менее 10 мкм, то даже в оболочке стандартного размера с диаметром 125 мкм можно расположить несколько сердцевин. При этом, по каждой из них можно передавать независимые потоки информации как по отдельным одномодовым волокнам.

Большую активность в области разработки и исследований многосердцевинных волокон проявляют мировые лидеры по производству телекоммуникационного волокна и оборудования для оптических систем связи (OFS, Corning, Alcatel-Lucent, NTT, NEC, Fujikura, Sumitomo и др.), а также связанные с ними исследовательские лаборатории и центры. Продемонстрирована передача информации со скоростями 1–2 Петабит/с на расстояние в несколько десятков километров. Однако для увеличения дальности передачи необходимо решить ряд технологических проблем, в первую очередь, необходимо создать усилители для многосердцевинных волокон [5.19].

Второй технологией, реализующей идею пространственного мультиплексирования, является технология маломодовых волокон. Сердцевина маломодового волокна поддерживает распространение нескольких пространственных мод (обычно от 3 до 10), по каждой из которых может быть передан независимый поток информации. Производится маломодовое волокно так же, как одномодовое односердцевинное (основной тип используемого волокна для распространения информационного сигнала), но с несколько увеличенным размером сердцевины. Параметры сердцевины (диаметр, профиль и разность показателей преломления) подбираются таким образом, чтобы волокно поддерживало распространение нескольких мод. Следует подчеркнуть, что выпускаемые в настоящее время многомодовые волокна не предполагается использовать для пространственного мультиплексирования. Использование мультиплексирования по модам подра-

зумевает, как и в случае волокон со многими сердцевинами, существенное усложнение компонентов и систем, что в настоящее время не оправдано с финансовой точки зрения.

Объединение двух методов позволило создать многосердцевинное многомодовое волокно. Продемонстрированное недавно волокно [5.20] содержит 36 сердцевин, каждая из которых поддерживает распространение 3 пространственных мод. В таком волокне можно одновременно передавать 108 пространственно мультиплексированных информационных канала. В работе [5.21] продемонстрирована передача 114 пространственных каналов по одному волокну.

Набор LP мод — не единственный, который может быть использован для пространственного мультиплексирования в маломодовых волокнах. Очень перспективным является использование для пространственного мультиплексирования системы мод, обладающих ненулевыми угловыми моментами [5.22]. Оптическая волна, обладающая таким моментом, имеет винтовую структуру поля и называется вортексом (vortex). Собственные функции угловых моментов, описывающих вортексы, образуют ортогональную полную систему и, таким образом, могут быть использованы для передачи информации.

Структура вортекса представляет собой распространяющуюся волну с характерным винтовым распределением фазы, которое может быть сгенерировано, например, с помощью специальной маски [5.23] — Рисунок 5.5.

Использование центрально-симметричных мод в ряде случаев предпочтительнее, чем, например, генерация и детектирование LP-мод. Определенные проблемы, возникающие при распространении вортексов в волноводе эквивалентны проблемам при распространении многомодового сигнала. Вортексы могут быть использованы, прежде всего, для мультиплексирования сигналов, предназначенных для распространения на короткие расстояния, например, в интерконнектах.

Следует отметить, что при применении вортексов необходимо исследовать сопутствующие проблемы, например, влияние модовой дисперсии на распространение вортексов, нелинейные эффекты и т. п. Часть этих проблем уже изучалась в рамках академических подходов и интересов.

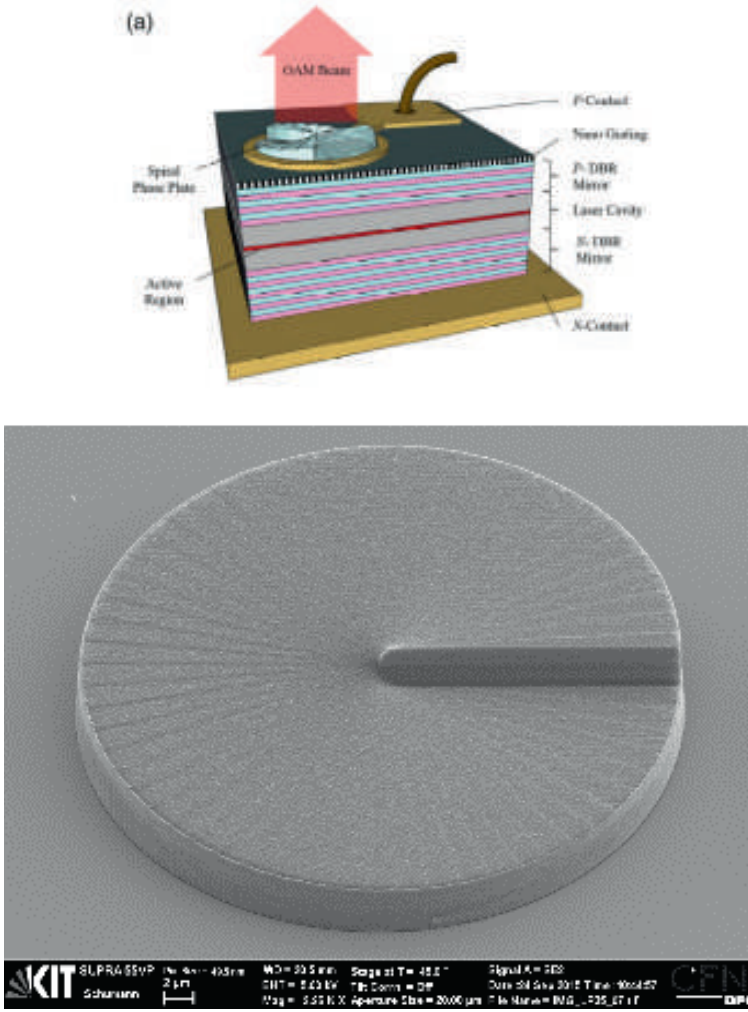


Рисунок 5.5 — Схема генерации вортексов и структура фазовой маски, используемой для такой генерации.

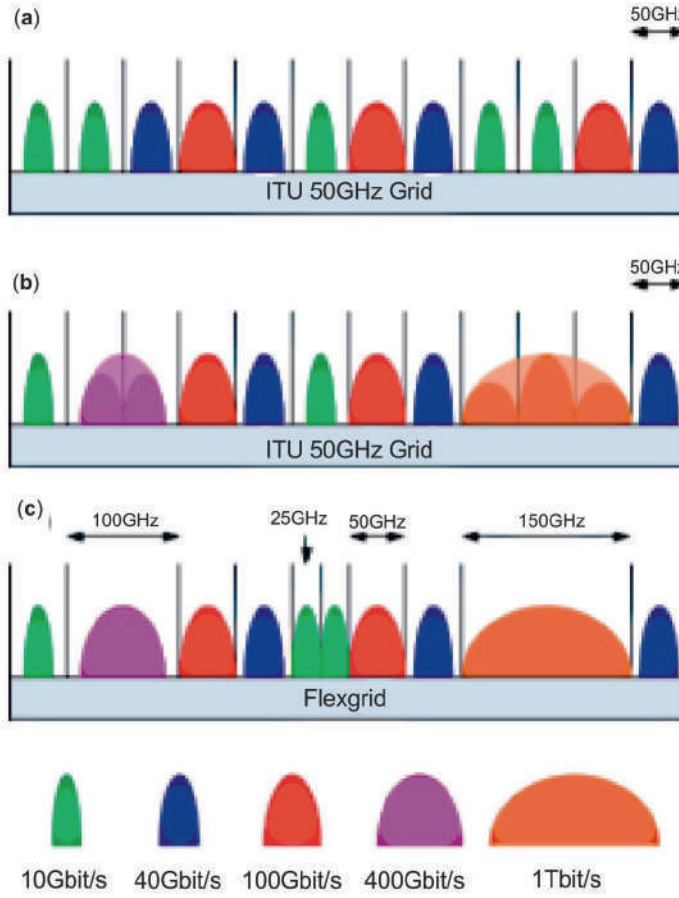
Источник: [5.23]

Суперканалы, спектральная инженерия и программно перестраиваемые сети. Использование нескольких несущих (поднесущих) для увеличения канальной скорости передачи информации позволяет получить канальную скорость 400 Гбит/с и 1 Тбит/с при меньших требованиях к быстродействию электроники, чем при использовании одной несущей (если используются форматы модуляции одного уровня сложности). Недостаток данной технологии — увеличение сложности цифровой обработки сигналов, необходимость синхронизации потоков данных, передаваемых с использованием разных поднесущих частот. Однако, именно эта технология позволяет получать на существующем сегодня оборудовании канальные скорости передачи информации 300–400 Гбит/с и даже 1 Тбит/с [5.24, 5.25].

Идея распараллеливания высокоскоростных потоков не нова. Она используется в системах связи разных уровней и в разных диапазонах длин волн. В частности, можно использовать для распараллеливания сигнала любой набор из нескольких обычных каналов. В опорных сетях связи целесообразно иметь возможность управлять как единым целым группой из компонент интегрированного высокоскоростного канала на оптическом уровне. Такую возможность предоставляет технология оптических суперканалов.

Суть этой технологии заключается в том, что некоторое количество (обычно от двух до десяти) частотных каналов объединяется в агрегированный суперканал, который при прохождении по оптической сети маршрутизируется оптическими устройствами как единый [5.26].

Для увеличения спектральной эффективности, а значит и пропускной способности системы связи при фиксированной полосе передачи, необходимо располагать каналы с максимальной плотностью. Максимально плотно можно располагать каналы с прямоугольным спектром модуляции сигналов. Формирование сигналов с заданными спектральными характеристиками называют «спектральной инженерией». Технология плотного расположения таких каналов широко исследуется как теоретически, так и экспериментально с целью создания экономичных коммерческих систем связи [5.27].



a — работа гетерогенной сети с канальными скоростями до 100 Гбит/с в фиксированной сетке 50 ГГц;
b — передача канальных сигналов с увеличенной скоростью до 400 Гбит/с и 1 Тбит/с становится невозможной;
c — технология Flexgrid позволяет использовать спектральные полосы необходимой ширины.

Рисунок 5.6 — Сравнение DWDM-систем с фиксированными полосами (Fixed grids) и гибкими полосами (Flexgrid)

Источник: [5.28]

Программно-перестраиваемые сети. Эффективность работы ВОЛС в реальных условиях можно существенно увеличить путем гибкого управления спектральной полосой, занимаемой каналом, в зависимости от скорости передачи и используемого формата. Существующие системы DWDM используют стандартную сетку 50 ГГц. В технологии Flexgrid рабочий спектр делится на узкие спектральные полосы-слоты (обычно 12,5 ГГц), расположенные вплотную друг к другу. Эти спектральные слоты могут объединяться для формирования спектральных блоков нужного размера [5.28, 5.30] — см. Рисунок 5.6.

Возможность применения технологии Flexgrid в коммерческих системах появилась только после создания и начала массового производства перестраиваемых спектральных селекторов-мультиплексоров, использующих технологию LCoS (Liquid Crystal on Silicon) [5.29]. С использованием технологии LCoS и спектрально селективных переключателей WSS (Wavelength Selective Switch) можно в реальном времени изменять размеры спектральных полос для разных каналов. Выделенный канал может занимать любое количество слотов, таким образом, ширина выделенной для этого канала полосы может изменяться в диапазоне от 12,5 ГГц (иногда 6,25 ГГц) до полной ширины С-диапазона (примерно 4,5 ТГц).

В реальных сетях связи трафик существенно изменяется во времени. Например, бизнес трафик максимален в течение рабочего дня, а вечером и ночью возрастает трафик частных потребителей, домовладений и т. п. Для повышения эффективности сетей связи предложено использовать технологию перестраиваемых транспондеров [5.31] совместно с Flexgrid — см. Рисунок 5.7.

В первом варианте рассматривалась возможность перестройки только скорости передачи информации — технология BVT (Bitrate Variable Transponder). В настоящее время разрабатываются транспондеры, через систему управления которых можно изменять формат модуляции, символьную скорость и занимаемую полосу — технология SDT (Software Defined Transponder). При использовании SDT в сетях Flexgrid появляется возможность дополнительной оптимизации сети в условиях динамически изменяющегося трафика (см. Рисунок 5.7): каналы теперь могут динамически подстраивать

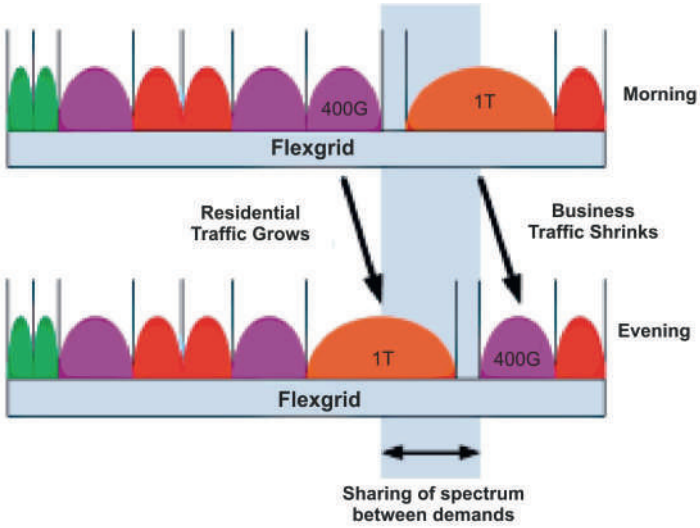


Рисунок 5.7 — В зависимости от времени суток два канала могут попеременно использовать некоторый участок спектра

Источник: [5.31

ширину полосы в зависимости от трафика, при этом освободившаяся полоса может быть использована соседними каналами.

Интенсивные исследования в области создания новых динамически перестраиваемых сетевых технологий проводятся в направлениях интеллектуальной маршрутизации, динамического выбора скорости передачи и размещения канала в спектре WDM, быстро перестраиваемых, эффективных по энергопотреблению, адаптивных по скорости оптических транспондеров.

Совершенствование методов обработки сигналов в когерентных системах связи. Цифровая обработка сигналов (DSP) — неотъемлемый компонент современных приемников когерентных систем связи. При помощи DSP удалось обеспечить работоспособность когерентных систем связи при сравнительно умеренных требованиях к физическим характеристикам передающего и опорного лазеров когерентного приемника [5.31].

Исследования методов обработки сигнала в когерентных системах связи сконцентрированы на упрощении алгоритмов обработки многоуровневых когерентных форматов модуляции, одновременной цифровой обработки сигналов в суперканале; совершенствовании методов ослабления перекрестных помех при поляризационном и пространственном мультиплексировании, в том числе с использованием технологии MIMO.

Компенсация искажений при цифровой обработке сигналов. Искажения за счет хроматической и поляризационной модовой дисперсии могут быть скомпенсированы в приемнике путем цифровой обработки электрического сигнала. Один из методов компенсации хроматической дисперсии основан на применении процедуры быстрого преобразования Фурье. Такое преобразование может выполняться в реальном времени на скоростях повторения, достаточных для современных форматов модуляции, то есть 40 ГГц. Это позволяет уделять меньше внимания (или вообще отказаться от) компенсации дисперсии на физическом уровне. Кроме прямой экономической выгоды, связанной с уменьшением количества компонентов ВОЛС, отсутствие блоков компенсации дисперсии (Dispersion Compensation Unit — DCU) повышает качество сигнала в длинных линиях связи.

Компенсация искажений позволяет существенно улучшить характеристики системы связи. В настоящее время в коммерческих приемниках когерентных систем связи формата DP-QPSK реализованы электронные методы компенсации хроматической дисперсии и поляризационной модовой дисперсии. Алгоритмы работы цифровых приемников продолжают совершенствоваться, идет поиск более эффективных и быстродействующих алгоритмов, способных работать в реальном времени с высокими символьными скоростями (до 60 Гбод) и с многоуровневыми форматами модуляции. Быстродействие электроники ограничено фундаментальными причинами и составляет приблизительно 100 ГГц. В настоящее время на рынке существуют приборы и компоненты, работающие на скоростях повторения приблизительно вполовину меньше.

Продолжаются интенсивные исследования методов цифровой обработки сигналов, позволяющих компенсировать

нелинейные искажения и, тем самым, увеличить дальность передачи информации [5.32, 5.33]. В основном исследования проводятся в off-line режиме для определения потенциальных возможностей исследуемых методов, среди которых следует отметить метод «back-propagation». Главным недостатком методов электронной компенсации нелинейных искажений является сложность используемых алгоритмов, особенно в режимах плотного расположения спектральных каналов. Это затрудняет их использование в реальном времени, однако работы в этом направлении интенсивно ведутся в ряде научных центров.

Развитие алгоритмов коррекции ошибок. Алгоритмы коррекции ошибок (Forward Error Correction — FEC) дали большой выигрыщ в качестве передачи информации еще в системах связи с прямым детектированием [5.34–5.36].

Коррекция заключается в том, что наряду с полезной информацией в оптический сигнал включается дополнительная информация, используемая для обнаружения и исправления ошибок в принятом сигнале. Применение коррекции ошибок позволило сохранить дальность работы оптических систем связи при переходе от скорости 2,5 Гбит/с к скорости 10 Гбит/с. Действительно, использование FEC эквивалентно увеличению чувствительности приемников, определяемой величиной отношения сигнал-шум.

В системах связи, использующих прямое детектирование, используется так называемая технология жесткого принятия решений (hard FEC). В когерентны системах связи с цифровой обработкой сигналов используются значительно более эффективные алгоритмы коррекции ошибок, так называемая технология мягкого принятия решений (soft FEC).

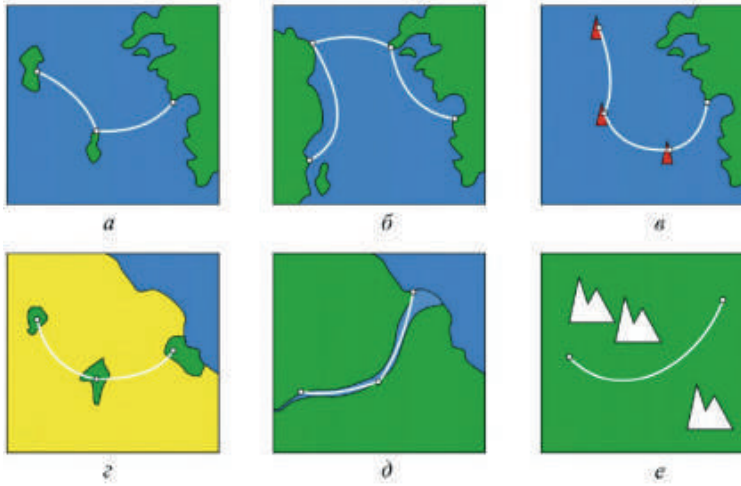
Совершенствование FEC продолжается. Идет поиск наиболее оптимальных алгоритмов, способных работать при все более высокой скорости передачи информации и со все большими значениями избыточности. При используемых в настоящее время значениях (до 20%) самые совершенные алгоритмы коррекции ошибок уже приблизились к теоретическому пределу Шеннона.

Увеличение безрегенерационной дальности ВОЛС

На первых этапах развития ВОЛС очень быстрыми темпами росла дальность безрегенерационной передачи. Сначала она росла за счет совершенствования волокна: на смену многомодовому волокну пришло одномодовое, потери в котором удалось примерно за 15 лет работы уменьшить с 10 до 0,2 дБ/км [5.37]. За последующие 15 лет (к концу XX века) уровень потерь удалось снизить до приблизительно 0,16 дБ/км (в отдельных образцах волокна уровень затухания снижен до 0,15 дБ/км), что близко к теоретическому пределу для кварцевого волокна (примерно 0,14 дБ/км). Следующий принципиально важный шаг — создание эрбиевых усилителей [5.38]. С их помощью дальность безрегенерационной передачи превысила несколько тысяч километров (в зависимости от пропускной способности это расстояние варьируется вплоть до 10.000 километров). Следующим шагом стало создание волокна со сдвинутой в красную область точкой нулевой дисперсии (DSF — Dispersion Shifted Fiber), которые позволили существенно уменьшить дисперсионные искажения сигнала, что особенно важно для высоких частот повторения. Необходимо отметить, что вызванные дисперсией искажения могут быть достаточно эффективно скомпенсированы с помощью цифровой обработки после оптоэлектронного преобразователя (детектора). В отличие от дисперсионных, цифровая компенсация нелинейных искажений, сложна (хотя и возможна, и работы в этом направлении ведутся [5.32, 6.33]), и основным методом является создание волокон с уменьшенной нелинейностью. Отметим, что в подавляющем большинстве волоконно-оптических линий связи используется обычное одномодовое волокно SMF либо DSF.

Исследования в этом направлении особенно актуальны для России. В настоящее время в густонаселенной части Европы среднее расстояние между усилителями составляет 80 км, в России — примерно 100 км. Причем, в некоторых ситуациях возникают задачи передать информацию на расстояние 300 — 400 км без использования промежуточных усилителей, то есть по однопролетной линии.

Однопролетные линии востребованны для организации связи между островами, удаленными прибрежными городами,



а — между островами;
б — для соединения прибрежных городов;
в — для соединения с буровыми платформами;
г — для соединения городов, разделенных пустыней;
д — для прокладки по дну рек;
е — для прокладки в малонаселенных районах.

Рисунок 5.8 — Однопролетные линии связи:

Источник: [5.42]

побережьем и нефтяными платформами на шельфе, для создания отводов от подводных магистральных линий связи, а также для прокладки ВОЛС в малонаселенных областях, что особенно актуально для России (Рисунок 5.8). Следует отметить, что в России компанией Т8 создан комплект оборудования, обеспечивающий дальность передачи по однопролетной линии до 500 км с суммарной скоростью 1 Тбит/с [5.39].

Дальность передачи для все более высоких частот повторения удается сохранить за счет различных технических приемов — прежде всего благодаря использованию дополнительных степеней свободы светового излучения и развитию технологии коррекции ошибок. Так, при переходе от 2,5G к 10G дальность передачи была сохранена за счет использования упреждающей коррекции ошибок FEC. При переходе от 10G к 40G — за счет использования фазовой модуляции

DPSK и технологии SuperFEC. При переходе от 40G к 100G — за счет когерентного приема, использования двух поляризаций сигнала (формат модуляции DP-QPSK) и технологии упреждающей коррекции ошибок с мягким принятием решений (Soft FEC).

Таким образом, в настоящее время основные технологии развиваются в следующих направлениях:

- применение распределенных усилителей и усилителей с удаленной накачкой;
- оптическая регенерация;
- специальные волокна с уменьшенной нелинейностью;
- волокна с малой физической задержкой.

Применение распределенных усилителей и усилителей с удаленной накачкой. В соответствии с теоремой Шеннона, при использовании оптимального кодирования информация может быть передана по линии связи конечной длины (с конечным уровнем шума) без ошибок со скоростью, пропорциональной ширине полосы передачи. В современных системах связи кодирование/декодирование сигнала осуществляется при цифровой обработке в приемопередающей аппаратуре в электрической форме. Совместно работающие приемник и передатчик являются регенераторами оптических сигналов (ОЕО регенераторы); они полностью восстанавливают все характеристики передаваемого сигнала. Недостатки ОЕО регенераторов — ограниченное электронными компонентами быстродействие и высокая стоимость. После изобретения оптических эрбиевых усилителей и технологии DWDM необходимость в использовании ОЕО регенераторов значительно сократилась, так как в современных ВОЛС с определенным шагом расстояния устанавливаются оптические усилители EDFA, одновременно восстанавливающие амплитуды большого числа спектральных каналов (до 96 в стандартной сетке 50 ГГц в С-диапазоне). Увеличить дальность безрегенерационной передачи информации позволяет применение усилителей с удаленной накачкой и распределенных усилителей. Последние максимально эффективны тогда, когда мощность сигнала практически не меняется при распространении вдоль волокна, то есть потери в точности компенсируются усилением.

Существенно увеличить дальность работы однопролетных и многопролетных ВОЛС позволяет применение распределенных усилителей и усилителей с удаленной накачкой [5.39–5.42]. Для снижения уровня шума и, соответственно, повышения качества передаваемого сигнала (качество — параметр оптического сигнала, пропорциональный отношению сигнал-шум), желательно обеспечить такой режим распространения сигнала по линии связи, когда мощность сигнала вдоль линии изменяется минимально. Простейший путь решения этой задачи — расположение усилителей на малом расстоянии друг от друга,— неприемлем по экономическим соображениям. Поэтому использование распределенных рамановских усилителей и их дальнейшая оптимизация представляет значительный интерес. Эти исследования становятся особенно актуальными, так как для внедрения многоуровневых форматов с большой символьной эффективностью (например, формата DP 16QAM), требуется существенно увеличить отношение сигнал-шум принимаемого сигнала.

Оптическая регенерация. Увеличить дальность передачи с использованием спектрально эффективных многоуровневых форматов позволяет оптическая регенерация. Как показано в ряде работ, регенерация оптических сигналов полностью оптическими методами (без преобразования в электрический сигнал, как в регенераторах, использующихся в современных ВОЛС) обладает большим потенциалом [5.18]. В целом, тенденция увеличения доли полностью оптических устройств в управлении и коммутации сигналов является закономерной. Прогресс в этой области будет в существенной степени зависеть от прогресса в области развития компонентной базы на основе нелинейно-оптических процессов.

Специальные волокна с уменьшенной нелинейностью позволяют увеличить дальность передачи без регенерации за счет увеличения мощности сигнала, вводимого в ВОЛС. Такие волокна особенно востребованы при прокладке трансокеанских линий связи. Для таких линий созданы специальные волокна с увеличенной площадью моды, в которых нелинейные искажения удалось снизить примерно в 1,5 раз.

Радикально уменьшить нелинейные искажения позволяют волокна с полой сердцевиной. В таких волокнах сер-

дцевина заполнена воздухом, нелинейность которого пренебрежимо мала по сравнению с нелинейностью кварцевого стекла (материала сердцевины современных телекоммуникационных волокон). Не менее важно, что в волокнах с полой сердцевиной потенциально можно уменьшить затухание до уровня меньше 0,14 дБ/км (минимально возможного для кварца), причем в существенно более широкой полосе длин волн. Однако пока уровень затухания в волокнах с полой сердцевиной значительно превышает 0,2 дБ/км, что не позволяет использовать их в сетях дальней связи. В настоящее время они востребованы для специфических применений в линиях связи, в которых требуется малая физическая задержка (low latency) [5.43].

Волокна с малой физической задержкой. Волокна с полой сердцевиной, в частности фотонно-кристаллические волокна с фотонными запрещенными зонами, позволяют радикально уменьшить нелинейные искажения. Для ряда приложений более важным оказывается то, что эти волокна обладают малой физической задержкой. Физическая задержка определяется скоростью распространения света в волокне. Если в кварцевом волокне скорость распространения сигнала примерно в 1,5 раза меньше чем в вакууме, то в волокне с полой сердцевиной сигнал распространяется практически без задержек. Потенциально в таких волокнах может быть достигнуто затухание меньше 0,2 дБ/км. Однако затухание в современных волокнах с полой сердцевиной значительно больше. Кроме того, технологии изготовления заготовок, из которых вытягиваются фотонно-кристаллические волокна, очень трудоемки. В результате стоимость волокна очень высока, что препятствует его массовому использованию в ВОЛС.

Поэтому можно прогнозировать, что волокна с малой физической задержкой найдут применение в тех специальных линиях связи, в которых даже малый (микросекундный) выигрыш во временной задержке дает экономический эффект, который многократно превышает стоимость волокна и затраты на переоборудование.

Использование фотонных интегральных схем

Увеличение степени фотонной интеграции направлено не только на создание более компактных фотонных устройство, но, главное, на снижение себестоимости производимой продукции и энергетических потерь. Ожидаемый экономический эффект от внедрения фотонных интегральных схем определяет растущий интерес к этому направлению исследований со стороны производителей компонент волоконно-оптических систем связи [5.44, 5.45].

Среди множества компонент, которые могут быть объединены на одном фотонном интегральном устройстве (Photonic Integrated Circuit — PIC) можно назвать делители пучков (beam splitters), решетки (gratings), соединители (couplers), поляризаторы (polarisers), интерферометры (interferometers), источники излучения, модуляторы, усилители и детекторы. Интеграция может осуществляться последовательно и параллельно. При последовательной интеграции в, например, телекоммуникационных устройствах, различные элементы чипа создаются и соединяются последовательно: лазер и питание лазера, модулятор и управляющая электроника, фотоприемник и приемная электроника. При параллельной интеграции чип состоит из набора усилителей, набора фотоприемников, нескольких мультиплексоров и демультиплексоров. Возможна комбинация двух архитектур с использованием модулей ввода-вывода, переключателей и межсоединений. Наивысший уровень — это монолитная интеграция, когда все оптические элементы, включая источники света, устройства управления светом, детекторы и электронные компоненты расположены на одной подложке. Наиболее перспективными материалами для монолитной интеграции являются полупроводниковые материалы, в частности, для диапазона 1550 нм, кремний и InP. В случае гибридной интеграции на одной подложке изготавливаются устройства управления светом, а дополнительные элементы, такие как лазеры и детекторы, размещаются на другой подложке и или непосредственно подсоединяются к интегральному фотонному устройству, или соединяются при помощи оптических волноводов. В качестве подложки для гибридных технологий используются диэлектрики; стекла, кварц или ферроэлект-

рические кристаллы. Технология, использующая сочетание кварца и кремния может рассматриваться как квазигибридная интеграция, при которой все компоненты кроме источников света могут быть изготовлены на одной подложке.

Электронно-оптические и оптоэлектронные преобразователи (интерконнекты)

Цель исследований, проводимых в этом направлении — найти наиболее подходящую платформу для создания фотонных интегральных схем и разработать технологию их массового производства. В настоящее время исследуются технологии фотонной интеграции на основе разных полупроводниковых материалов. Наиболее перспективными считаются две платформы: на основе кремния и на основе InP. С технологической точки зрения очень заманчиво использовать кремниевые технологии. Однако, кремний — не прямозонный полупроводник, что затрудняет создание источников света (лазеров) и усилителей на его основе. Поэтому в настоящее время широко исследуются возможности создания передатчиков и приемников для сетей дальней связи на основе InP или гибридных технологий.

Основной проблемой в создании интерконнектов и, в более широком смысле, фотонных интегральных схем, является несовместимость полупроводниковых и кварцевых технологий. Иными словами, источники света и волноводы для его передачи и обработки требуют для их создания несовместимых на сегодняшний день технологий. Поиски путей для объединения таких технологических процессов в настоящее время представляют собой одну из наиболее актуальных задач [5.46].

Развитие методов шифрования передаваемой информации

В последнее время на фоне нескольких резонансных международных эпизодов особое внимание привлекла проблема конфиденциальности информации.

Проблема защиты информационных потоков от несанкционированного доступа включает в себя много аспектов.

С появлением волоконно-оптических линий связи появилась новая опасность, а именно техническая возможность несанкционированного доступа к оптическому сигналу в волокне. При этом возможен как доступ к самой информации, так и искажение, подмена, либо блокирование информационного потока. Система мониторинга современной линии в большинстве случаев не способна отличить несанкционированный доступ от периодически возникающих технических сбоев. Более того, все современные волоконно-оптические линии связи проектируются и строятся в предположении, что описанных выше возможностей несанкционированного доступа не существует.

В основном обеспечение конфиденциальности информационных потоков производится путем кодирования, при этом с увеличением частоты повторения кодирование информации в реальном времени становится затруднительным. В последнее время появились новые способы защиты, которые применяются на физическом уровне. Часть из них основана на классических методах, другие, используют квантовые свойства фотонов. Так называемая «квантовая коммуникация» является одним из таких методов, хотя, по сути, представляет собой лишь детектор несанкционированного доступа. Разработка методов защиты информационных потоков на физическом уровне является одной из наиболее актуальных проблем, связанных с волоконно-оптическими линиями связи.

Замена электронно-ориентированной компонентной базы для обработки сигнала на компоненты на основе квазичастиц

Принципиально новая ступень развития фотоники связана с фундаментальным процессом перехода от электронно-ориентированных систем (то есть систем, функциональные характеристики которых обусловлены свойствами электронов) к фотонно-ориентированным системам. Электрон, будучи простым в управлении (взаимодействии), в то же время обладает заметной массой, а значит и инертностью. Частоты, с которыми оперируют электронные устройства, фундаментально ограничены величинами приблизительно 100 ГГц.

В то же время динамика безмассового фотона фундаментально ограничена лишь скоростью света в данной среде. Фотон сам по себе является невзаимодействующей частицей, и поэтому плохо управляем. Но связанные состояния фотонов и электронов в самых разнообразных формах (квазичастицы) представляют собой как раз тот набор элементарных состояний, которые с одной стороны движутся со скоростью фотона, а с другой — прекрасно управляемы внешними полями.

Именно этот переход от электронно-ориентированных систем к системам на основе квазичастиц и представляет собой принципиально новый магистральный путь развития.

Например, плазмоны (квазичастицы, состоящие из связанных фотонов и электронов) наряду с высокими скоростями позволяют осуществить локализацию на субволновых размерах. На основе таких квазичастиц возможно построение полного ряда пассивных и активных компонент для использования в системах передачи и обработки информации. Такие фотонные компоненты должны прийти на смену электронным аналогам и послужить основой нового поколения фотонных устройств [5.47, 5.48].

5.1.3. Барьеры развития — научные и технологические

В предыдущем подразделе было рассказано о научных и технологических задачах, над которыми в данный момент активно работают ученые и инженеры. В данном подразделе будут описаны основные научные и технологические барьеры, затрудняющие решение каждой из перечисленных задач.

Квадратурное и поляризационное мультиплексирование. Поскольку в когерентном формате распространяются сразу несколько информационных потоков (например, в формате DP-QPSK распространяется в общей сложности четыре независимых информационных потока, по два в каждой поляризации), то их разделение в режиме реального времени также требует высокоскоростной обработки сигнала.

В настоящее время практически во всех приемниках когерентного сигнала стоит стандартный чип, который

и осуществляет такую обработку (DSP chip). Этот чип составляет по сути основу приемного блока. При этом важно отметить, что алгоритм работы такого чипа, равно как и рабочая документация, не находятся в открытом доступе. Поэтому возможность утечки информации, несанкционированного доступа, а также блокирования работы такого чипа внешним сигналом полностью исключить нельзя. Разработка отечественного аналога такого чипа является абсолютно необходимой с точки зрения информационной безопасности.

Многоуровневые форматы модуляции Основной технологический барьер для внедрения многоуровневых форматов модуляции — снижение дальности передачи и повышение сложности цифровой обработки сигналов. Поэтому внедрение систем связи, использующих многоуровневые форматы модуляции, начнется с городских и междугородних опорных сетей. Кроме того, дальность работы систем связи с многоуровневыми форматами будет увеличиваться постепенно, по мере внедрения новых методов обработки сигналов, новых методов усиления, новых методов коррекции ошибок.

Увеличение символьной скорости передатчиков и приемников Увеличение скорости электронными методами является важнейшей задачей, решение которой снизит эксплуатационные затраты, энергопотребление и повысит эффективность управления сетями связи [5.10]. Однако, решение этой задачи наталкивается на принципиальные физические ограничения быстродействия электронных устройств. Общепринято, что верхним фундаментальным пределом для быстродействия компонентов на основе кремниевых транзисторов является 100 ГГц; в реальности быстродействие ограничивается частотами повторения приблизительно в два раза меньшими.

Увеличение символьной скорости при использовании только оптических методов, например, технологии оптического временного мультиплексирования (OTDM), на современном уровне развития систем связи не имеет принципиальных физических ограничений. Применению этой технологии препятствуют скорее технологические ограничения, связанные с отсутствием эффективных нелинейно-оптических элементов. По мере развития компонентной базы фотоники эти препятствия могут быть, в конечном счете, успешно преодолены.

Методы спектрального мультиплексирования. Традиционная технология спектрального мультиплексирования (технология DWDM с фиксированной сеткой частот 50 ГГц) уже достигла высокого уровня совершенства. Дальнейшее развитие будет идти по направлению создания реконфигурируемых мультиплексоров (ROADM) и полностью оптических коммутируемых узлов (OXC). В настоящее время быстрое развитие полностью оптических сетей сдерживается только отсутствием эффективных оптических устройств, преобразующих несущую длину волны оптического сигнала (номер DWDM канала).

По мнению многих экспертов, развитие динамически управляемых сетей DWDM будет идти в направлении полностью оптических сетей коммутации пакетов или коммутации всплесков (optical burst swathing). Основное препятствие на этом пути — отсутствие эффективных фотонных переключателей пакетов, для реализации которых необходимо создание нелинейных фотонных устройств, выполняющих простейшие цифровые операции. Прогресс в этом направлении тесно связан с развитием элементной базы интегральной фотоники. Большие надежды связываются, в частности, с использованием связанных состояний фотонов и квазичастиц.

Методы пространственного мультиплексирования в многосердцевинных и маломодовых волокнах, вортексы. Это последний, еще незадействованный современными системами связи метод мультиплексирования. Изготовление многосердцевинных волокон требует существенной модификации технологического процесса на стадии изготовления заготовок. В настоящее время технология изготовления заготовок, как за рубежом, так и в России, обеспечивает выпуск только небольших экспериментальных партий волокна для проведения научных исследований.

Методы ввода излучения сразу в несколько сердцевин базируются на известных и разработанных технологиях. Основной проблемой в данном случае является консервативность провайдеров, так как массовый переход на новый тип волокон требующий модернизации многих компонентов и блоков, для них непривлекателен. Тем не менее такие волокна могут пойти в массовое производство если будет установлено, что это единственный способ увеличить пропускную способность линий связи.

Основной экономический барьер для внедрения *пространственного мультиплексирования* — необходимость замены кабельной инфраструктуры волоконно-оптических сетей связи. Это очень дорогостоящий процесс, поэтому в сетях дальней связи внедрение технологии пространственного мультиплексирования не ожидается раньше, чем через 10 лет. По-видимому, технологии пространственного мультиплексирования начнут применяться сначала в сетях центров обработки данных для соединений длиной менее 10 км, для которых не требуется использование оптических усилителей.

В последнее время в России введен в эксплуатацию ряд заводов по производству оптического волокна. Также в России действует почти два десятка заводов по производству кабелей (в том числе оптических), которые при условии полной загрузки не только полностью покрывают потребность внутри страны, но и способны обеспечивать поставки на внешние рынки.

Суперканалы и спектральная инженерия. Принципиальных технологических препятствий для внедрения технологии суперканалов и спектральной инженерии нет. Вопрос о целесообразности внедрения таких технологий лежит в экономический плоскости. Поскольку уже появились потребности во внедрении интерфейсов, поддерживающих стандарты 400 Гбит/с и 1 Тбит/с Ethernet, то следует ожидать появления систем дальней связи, поддерживающих такие канальные скорости [5.49].

Совершенствование методов цифровой обработки сигналов в когерентных системах связи. Методы и алгоритмы цифровой обработки сигналов в оптических системах связи во многом базируются на разработках, используемых в более низкоскоростных системах радиосвязи. Основная технологическая проблема, возникающая при использовании этих методов в высокоскоростных системах связи с символьной скоростью порядка 30 Гбод и больше, вызвана ограниченным быстродействием электронных компонент.

Компенсация искажений при цифровой обработке сигналов. Дальнейше увеличение быстродействия связывают с переходом от электрона как элементарного носителя к квазичастицам (например, поляритонам), что представляет собой

качественный скачок и изменение всей существующей парадигмы. Так называемая «полностью оптическая обработка» (all-optical processing), которая не имеет принципиальных ограничений по быстродействию помимо скорости света, является целью исследователей на протяжении уже многих лет.

Развитие алгоритмов коррекции ошибок. При используемых в настоящее время значениях избыточности (до 20%) самые совершенные алгоритмы коррекции ошибок уже приблизились к теоретическому пределу Шеннона. Это касается ошибок, возникающих в условиях действия аддитивных белых гауссовых шумов (AWGN). Большая проблема — устранение «кластерных» ошибок, возникающих в нелинейных режим работы оптических систем связи. Работы в направлении быстродействующих алгоритмов исправления «кластерных» ошибок позволяют надеяться на прогресс в этом направлении.

Применение распределенных усилителей и усилителей с удаленной накачкой. Распределенные рамановские усилители уже внедрены во многие существующие линии и сети связи. В настоящее время при применении этих усилителей существуют проблемы технического плана, а именно выбор длин волн накачки, стабильность работы лазеров накачки при системах обратной связи, уменьшение шумов в случае попутной накачки, взаимное функционирование рамановских и эрбиевых усилителей и т. п.

Оптическая регенерация. Тенденция увеличения доли полностью оптических устройств в управлении, коммутации и обработке сигналов является закономерной. Прогресс в этой области будет в существенной степени зависеть от прогресса в области развития компонентной базы на основе нелинейно-оптических процессов. Основным технологическим барьером на пути применения оптической регенерации является тот факт, что применение нелинейных оптических процессов требует высоких мощностей управляющего сигнала. К тому же полностью оптические регенераторы восстанавливают сигналы только отдельных DWDM каналов. Усилители современных систем связи, однако, обрабатывают до 100 каналов одновременно.

Специальные волокна с уменьшенной нелинейностью. Крупнейшие производители оптического волокна ведут исследования в области создания специальных волокон с уменьшенной

нелинейностью. Такие волокна обеспечивают увеличение дальности безрегенерационной передачи за счет увеличения максимальной допустимой мощности сигнала, вводимой в ВОЛС. Принципиальным физическим ограничением на пути снижения нелинейности кварцевых волокон является тот факт, что величина нелинейного показателя преломления n_2 изменяется в очень небольших пределах. Наименьшей нелинейностью среди кварцевых стекол обладает беспримесное чисто кварцевое стекло. Поскольку волокно с чисто кварцевой сердцевиной (PSCF — pure silica core fiber) одновременно с этим обладает наименьшим затуханием (менее 0,16 дБ/км), то с технической точки зрения оно является наиболее совершенным. Его массовому применению препятствуют чисто экономические причины: такое волокно в силу технологии его изготовления оказывается существенно дороже стандартного (SSMF — standard single mode fiber).

Значительно уменьшить нелинейность кварцевого волокна можно за счет увеличения площади моды, так как при этом уменьшается интенсивность светового сигнала. В настоящее время несколько компаний создали волокна с увеличенной примерно в 1,5 раза площадью мод. Такие волокна ориентированы в первую очередь на применение в трансокеанских линиях связи. Применение волокна с увеличенной площадью мод в наземных ВОЛС ограничено высокой чувствительностью такого волокна к микро- и макроизгибам, возникающим при прокладке, перепадах температуры и других особенностей наземных линий связи. Но самый главный фактор — экономический. Трансокеанские линии связи намного дороже наземных, поэтому стоимость (в расчете на один бит) передачи информации по таким волокнам очень высока и экономический эффект от увеличения их пропускной способности значительно превышает затраты на внедрение.

Волокна с малой физической задержкой. Главный технологический барьер для массового внедрения оптических волокон с малой физической задержкой (волокна с полой сердцевиной, фотонно-кристаллические волокна) состоит в их низкой технологичности, обусловленной сложной структурой и большим числом последовательных операций, выполняемых при их изготовлении.

В настоящее время как по величине затухания света, так и по цене они значительно превосходят традиционные кварцевые телекоммуникационные волокна. Поэтому вопрос об использовании их в некоторых специальных приложениях — экономический.

Исследования в области волокон с полой сердцевиной ведутся крупнейшими производителями (Corning, OFS) и поэтому следует ожидать постепенного улучшения, как технических параметров такого волокна, так и себестоимости его производства.

Использование фотонных интегральных схем. Принципиальных препятствий для использования фотонных интегральных схем нет. Однако они не достигли пока степени интеграции, характерной для электронных схем.

Основной барьер для быстрого развития технологии и массового производства фотонных интегральных схем — отсутствие единой технологической платформы.

В настоящее время в качестве материалов для подложки используются множество типов стекол, диэлектрических кристаллов и полупроводников. Сегодня наиболее часто используются стекла, ниобат лития, кварц на кремнии (silica on silicon), полупроводники III–V группы (в основном InP) и полимеры. У каждого материала есть свои достоинства и недостатки и выбор зависит от конкретных применений.

Много надежд связано с прогрессом в области кремниевой фотоники. Фотоника на основе кремния на диэлектрике (Silicon-on-insulator (SOI) photonics) комплементарна технологии CMOS. Эта технология используется для создания различных устройств: модуляторов и полностью оптических волновых конверторов (all-optical wavelength converters — AOWC) в диапазоне $\lambda = 1.5$ мкм. Большой коэффициент преломления кремния ($n_{Si} = 3.5$) обеспечивает сильную локализацию света, полезную для повышения эффективности нелинейно-оптических эффектов. Главными преимуществами кремниевой технологии являются низкая цена и отличное оптическое качество кремниевых подложек, а также массовое производство и опыт работы с кремнием в микроэлектронике. Однако кремний — плохой материал для создания лазеров, так как он непрямозонный полупроводник. Сопряжение же CMOS технологии с технологией производства,

например, полупроводниковых лазеров — задача, в настоящее время не получившая общепринятого решения.

Электронно-оптические и оптоэлектронные преобразователи (интерконнекты). Проблемы при создании эффективных интерконнектов в основном технологические и повторяют описанные в предыдущем разделе проблемы при создании фотонных интегральных схем.

Развитие методов шифрования передаваемой информации. Традиционные методы шифрования широко используются в системах связи специального назначения. Наряду с ними развиваются методы шифрования на физическом уровне. В настоящее время предложено множество различных методов кодирования информации на физическом уровне и вопрос о выборе конкретной технологии определяется надежностью и экономичностью решений, а главное возможностью их использования в высокоскоростных сетях связи.

Замена электронно ориентированной компонентной базы для обработки сигнала на компоненты на основе квазичастиц. Исследования в этой области весьма многообещающи, но находятся на начальной стадии. Основной барьер — неопределенность сроков возврата инвестиций, вложенных в исследования и разработки в данной области. Развитие наноплазмоники за прошедшее десятилетие также стимулировало интерес к данной тематике. Возможность практического применения наноплазмоники в реальных устройствах линий связи обусловлена преодолением двух барьеров, а именно больших пассивных потерь в плазмонных структурах и сопряжении микроразмерных (световоды) и наноразмерных (плазмонные волноводы) структур.

5.1.4. На каком временно́м горизонте можно ожидать коммерциализации новых технологий

В соответствии с перечисленными в предыдущем разделе направлениями исследований, ниже дается оценка времени коммерциализации для каждой из них.

Квадратурное и поляризационное мультиплексирование. В настоящее время в мире существуют несколько фирм, выпускающих линейку оборудования для когерентных форматов модуляции с использованием квадратурного и по-

ляризационного мультиплексирования. Системы связи со скоростью 100 Гбит/с, использующие формат модуляции DP-QPSK, уже выпускаются в коммерческих масштабах. В России также есть фирма, выпускающая готовый продукт, который хорошо зарекомендовал себя в эксплуатации, например, во время Олимпийских Игр в Сочи в 2014 году — фирма «Т8». Выпускаемые транспондеры «Волга» по техническим параметрам не уступают зарубежным аналогам. Однако в настоящее время в транспондерах «Волга» используются зарубежные компоненты. Среднее время коммерциализации новых разработок в области когерентных систем связи составляет три года при условии достаточного финансирования.

Многоуровневые форматы модуляции. Опытные образцы транспондеров, использующих многоуровневые форматы модуляции, уже доступны коммерчески. Освоение их массового выпуска может занять от 2 до 3 лет и будет зависеть от потребностей рынка. Сначала такие устройства будут использоваться в относительно коротких линиях связи с высоким качеством оптического сигнала, например, в крупных городах, в междугородных соединениях на относительно небольшом расстоянии, для соединения центров обработки данных. Опытные участки линий связи, использующих многоуровневые форматы, могут быть переданы в коммерческую эксплуатацию уже в ближайшие 1–2 года.

По всей видимости, совместное внедрение многоуровневых форматов и распределенных усилителей для опорных сетей связи начнется в ближайшие 5 лет в первую очередь для соединения высокоскоростными линиями связи центров обработки данных.

Увеличение символьной скорости передатчиков и приемников происходит постепенно. Сейчас наиболее распространенной символьной скоростью в когерентных системах связи является 30 Гбод. По всей видимости эта символьная скорость будет доминирующей в течение по крайней мере ближайших пяти лет. В дальнейшем возможен переход к системам, использующим символьные скорости от 40 до 60 Гбод. Переход к коммерческим системам связи с символьными скоростями 100 Гбод ожидается не ранее, чем через 7–10 лет.

Методы спектрального мультиплексирования уже широко используются в сетях связи разного уровня. В ближайшее

время можно ожидать последовательного внедрения новых технологий изготовления компонент, которые обеспечат снижение их стоимости при массовом производстве. В ближайшие пять лет можно ожидать внедрения интегрированных многоканальных передатчиков и приемников, изготавливаемых по технологиям интегральной фотоники.

Продолжатся интенсивные научные исследования в области динамически управляемых сетей DWDM. Однако, внедрение полностью оптических сетей коммутации пакетов или коммутации всплесков (optical burst swathing) начнется не ранее, чем через 10 лет.

Методы пространственного мультиплексирования в многосердцевинных и маломодовых волокнах, вортексы. Такие методы достаточно многообещающи, их технические характеристики приближаются к требованиям коммерческих систем. Однако, для практического использования методов пространственного мультиплексирования необходимо создать усилители, пространственные мультиплексоры и демультиплексоры, устройства коммутации, оборудование для сварки и т. п. Тем не менее, можно ожидать, что технически системы связи с пространственным мультиплексированием будут готовы к промышленной эксплуатации уже через 5–10 лет. Начало же их коммерческого внедрения будет зависеть от многих, в первую очередь экономических, факторов.

Суперканалы, спектральная инженерия и программно перестраиваемые сети. В настоящее время есть технологическая возможность внедрения систем связи, использующих суперканалы и спектральную инженерию. Начало их активного внедрения в коммерческие сети связи можно ожидать в ближайшие несколько лет. В большой степени вопрос о внедрении таких систем — экономический, поэтому многое будет зависеть от потребностей пользователей сетей связи.

Программно-перестраиваемые сети с технологической точки зрения могут быть внедрены уже в ближайшие 1–5 лет. Однако начало их фактического внедрения будет определяться экономической целесообразностью, которая очень сильно зависит от сложности топологии сетей, их загруженности, экономической модели взаимодействия операторов связи с потребителями услуг связи и от многих других факторов. Потребность России во внедрении программно-

перестраиваемых сетей связи существенно ниже, чем в Европе и США, ввиду более простой топологии сетей.

Совершенствование методов цифровой обработки сигналов в когерентных системах связи. В ближайшее десятилетие совершенствование приемопередающей аппаратуры когерентных систем связи будет во многом определяться прогрессом методов цифровой обработки сигналов (DSP). Особенно будет возрастать роль алгоритмов DSP по мере внедрения многоуровневых квадратурных форматов модуляции (16QAM и выше).

В ближайшие 3–5 лет следует ожидать появление программно-перестраиваемых транспондеров, которые без физического вмешательства будут иметь возможность переключать используемый формат модуляции, алгоритм исправляющего ошибки кодирования (FEC) и другие параметры работы устройств цифровой обработки информации.

Компенсация искажений при цифровой обработке сигналов. В ближайшее время будут совершенствоваться алгоритмы компенсация линейных искажений при цифровой обработке сигналов, особенно при использовании многоуровневых форматов модуляции с высокой спектральной эффективностью. Также возможно появление коммерчески привлекательных алгоритмов компенсации линейных перекрестных помех в Найквист-WDM системах связи и их использование в коммерческих целях.

Что касается алгоритмов компенсации нелинейных искажений, то в системах DWDM с плотным расположением каналов сложность алгоритмов настолько высока, что экономически привлекательные реализации таких устройств не следует ожидать в ближайшие 5 лет. Хотя научные исследования в этой области продолжаются, оценки показывают, что выигрыш в качестве сигнала при использовании алгоритмов компенсации нелинейных искажений не превышает 1,5 дБ.

Развитие алгоритмов коррекции ошибок. В ближайшие 1–5 лет можно прогнозировать эволюционное развитие этих алгоритмов. В первую очередь будут развиваться алгоритмы коррекции ошибок с мягким принятием решений (soft FEC) для многоуровневых форматов модуляции. В течение 5 лет могут появиться алгоритмы коррекции ошибок с избыточностью до 50% и больше. Перспективы их коммерческого

внедрения будут очень сильно зависеть от сложности алгоритмов и наличия вычислительных ресурсов для их реализации в режиме реального времени.

Применение распределенных усилителей и усилителей с удаленной накачкой. Среди новых методов усиления и регенерации оптических сигналов наиболее близки к коммерческому внедрению технологии, основанные на применении распределенных усилителей и усилителей с удаленной накачкой. Можно прогнозировать, что использование распределенных усилителей в коммерческих системах связи начнется одновременно с внедрением многоуровневых форматов, так как для перехода от систем связи с форматом DP-QPSK к системам связи на основе форматов DP 8QAM или DP 16QAM требуется увеличить качество сигнала на 3–6 дБ. Поскольку постепенное внедрение многоуровневых систем связи начнется через 2–5 лет, то и внедрение распределенных усилителей можно ожидать в этот период времени. Что касается России, то для нашей страны внедрение технологий распределенного усиления и удаленной накачки возможно будет связано с прокладкой линий связи на труднодоступных территориях, где увеличение дальности безрегенерационной передачи информации даст большой экономический эффект. В России уже сегодня производится оборудование для передачи информации по линиям с пролетами большой длины (от 250 до 400 км).

Среди незадействованных в настоящее время спектральных диапазонов единственный кандидат на использование в ближайшие 5 лет — это спектральный L-диапазон. Для этого диапазона разработаны усилители, затухание в этом диапазоне близко к минимальному. Начало коммерческого использования других спектральных диапазонов ранее, чем через 5 лет, маловероятно в силу отсутствия эффективных оптических усилителей.

Оптическая регенерация. Оптическая регенерация попрежнему, как и 15 лет назад, остается многообещающей научной дисциплиной, однако никаких признаков коммерциализации данной технологии не видно. В сетях дальней связи не следует ожидать внедрения раньше, чем через 10 лет. Возможно, больше шансов на внедрение имеет технология оптической регенерации в системах передачи информации между центрами хранения данных.

Специальные волокна с уменьшенной нелинейностью. Кабельная инфраструктура является наиболее консервативной частью волоконно-оптических сетей связи. Плановый срок ее эксплуатации составляет 25 лет, в то время как среднее время морального старения активного оборудования составляет примерно 5 лет. Поэтому технические новшества в этой области внедряются операторами связи очень осторожно. В настоящее время полностью готовы к коммерческому внедрению специальные кварцевые волокна с уменьшенной нелинейностью, которые, к тому же, обладают минимальным затуханием. Однако, операторы связи очень неохотно внедряют такие волокна, хотя экономический эффект значительно превышает увеличение стоимости относительно стандартного одномодового волокна. Волокна с полой сердцевиной на сегодняшний день еще даже в опытных образцах не достигли параметров, необходимых для их внедрения в коммерческие системы связи.

Волокна с малой физической задержкой. Только один тип волокон с полой сердцевиной — волокна с малой физической задержкой могут найти практическое применение в ближайшие 5 лет для специфических приложений (биржи, соединение между суперкомпьютерами).

Использование фотонных интегральных схем. Использование фотонных интегральных схем в транспондерах фактически уже началось, однако степень интеграции в настоящее время невысока: выпускаются интегрированные передатчики и приемники в виде отдельных устройств. В ближайшие 10 лет будет происходить эволюционный рост степени интеграции компонент и подсистем оптических сетей связи. При этом будет происходить замена модуляторов, изготовленных по технологии $LiNbO_3$ технологией InP и, возможно кремниевой технологией. В первую очередь смена технологий коснется сетей доступа и клиентских сетей. Затем (примерно через 5 лет) смена технологии коснется сетей дальней связи.

Электронно-оптические и оптоэлектронные преобразователи (интерконнекты). Интерконнекты в настоящее время находятся на стадии запуска в производство. Прогнозируется, что первые поколения интерконнектов будут активно внедрятся в ближайшие 3–5 лет, с последующей заменой на более совершенные устройства следующих поколений.

Развитие методов шифрования передаваемой информации. В сетях дальней связи в настоящее время шифрование не производится, так как операторы связи используют бизнес-модель, в соответствии с которой они предоставляют услуги по передаче информации, а шифрование и другие меры по защите информации ложатся на заказчиков услуг связи.

Информация о способах противодействия несанкционированному доступу в основном является закрытой. Известно, что основным способом защиты, применяемым в настоящее время, является кодирование, которое постоянно совершенствуется.

Квантовые способы защиты информационных потоков технологически готовы к внедрению, однако они требуют создания дополнительной инфраструктуры — фактически еще одной сети связи, предназначенной для распределения квантовых ключей. Это требуют достаточно существенной технической модернизации не только производимого оборудования, но и принципов работы сетей связи. Поэтому в настоящее время они непривлекательны для операторов связи с точки зрения дополнительных затрат. Известны и другие успешно протестированные способы защиты информации на физическом уровне, однако их коммерциализация также зависит от спроса со стороны операторов (провайдеров услуг связи). С технической точки зрения различные устройства защиты информации на физическом уровне могут быть готовы в течение 1–5 лет.

5.1.5. Оценки текущего и потенциального спроса (масштабы рынков)

DWDM-системы. Объем рынка DWDM систем связи в настоящее время составляет $16–17 млрд и включает в себя оборудование с канальной скоростью 10, 40 и 100 Гбит/с. Среднегодовая скорость прироста рынка (CAGR) составляет 10%. При этом сегмент 100 Гбит/с DWDM с объемом рынка $6–7 млрд демонстрирует большую скорость роста рынка (CAGR), равную 75%.

Оборудование ЦОД. Активно развиваются оптические системы связи для центров обработки данных (ЦОД). При сегодняшнем объеме рынка $1,6 млрд среднегодовая скорость

прироста рынка (CAGR) составляет 20% (суммарно по оборудованию со скоростями 10, 40 и 100 Гбит/с).

Сегмент 40 Гбит/с для ЦОД — наиболее крупный (среди оборудования ЦОД) с объемом $0,7 млрд демонстрирует и наибольший годовой темп роста рынка (CAGR), равный 40%.

Сегодня такой же объем рынка ($0,7 млрд) приходится на сегмент оборудования для ЦОД со скоростью 10 Гбит/с. Однако прирост рынка в этом сегменте практически отсутствует (CAGR на уровне 1%).

Доля сегмента оборудования сетей связи для ЦОД со скоростью 100 Гбит/с составляет $0,2 млрд. Темп роста этого сегмента в 2015 году (CAGR) составил 10%, но в 2016 году ожидается резкое увеличение среднегодового роста рынка (CAGR) до величины порядка 40%.

Пассивные оптические сети (Passive Optical Network — PON). Активно развивается технология пассивных оптических сетей (PON). При объеме рынка $14 млрд среднегодовая скорость прироста рынка (CAGR) составляет примерно 20%. Рост рынка достигается при уменьшении стоимости оборудования.

Оптические компоненты для телекома. Технологии производства оптических компонент для телекоммуникационных приложений быстро совершенствуются. Наблюдается смена поколений. При объеме рынка $4,5 млрд среднегодовая скорость прироста рынка (CAGR) составляет примерно 10%.

Производство оптического волокна. Технологии производства оптического волокна устоялась и в последние годы мало изменяется. При объеме рынка $2 млрд среднегодовая скорость прироста рынка (CAGR) составляет примерно 20%. Динамика потребления оптического волокна в физическом выражении приведена на Рисунке 5.9.

Крупнейший потребитель оптического волокна — Китай. С 1993 по 2015 годы проложено свыше 600 млн км кабеля в одноволоконном исчислении. С 2009 года в среднем доля потребления оптического волокна составляет более 45% от общего объема.

Масштабы российского рынка. В России, в отличие от зарубежья, идет этап активного строительства сетей высокоскоростной передачи данных. В связи с этим планируется более чем 30% рост рынка магистрального оборудования DWDM.

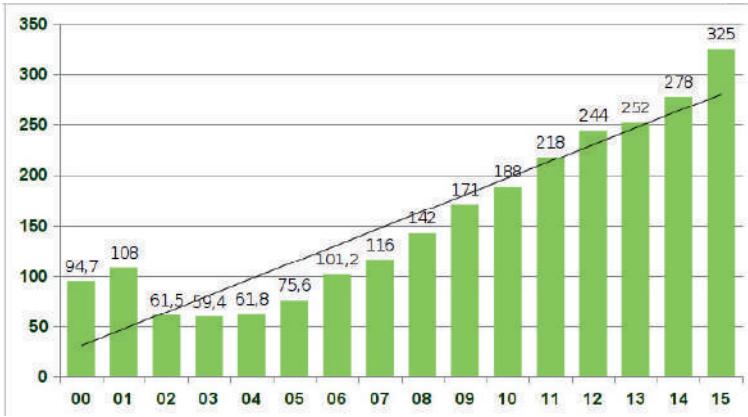


Рисунок 5.9 — Динамика мирового потребления волоконно-оптических кабелей (млн. км. ОВ, 2015 г. — прогноз) по данным CRU и ОАО ВНИИКП

По оценке Всемирного Банка, в России в ближайшие годы будет проложено порядка 200.000 километров волоконно оптических линий. Если ориентироваться на передовые технологии, для такого количества линий потребуется громадная инфраструктура, начиная от техники и технологий прокладки и до унификации и сертификации продукта для российского рынка. Детальный анализ перспектив рынка в России требует информации не представленной в открытом доступе.

В качестве первого грубого приближения можно оценить размер российского рынка на уровне 1% от мирового.

5.2. Квантовые методы передачи информации

5.2.1. Введение

Актуальность квантовых методов передачи и обработки информации обуславливается тем, что они направлены на решение таких остро стоящих сегодня глобальных технологических проблем, как: обеспечение безусловной конфиденциальности при передаче данных [5.50] в условиях увеличения объемов трафика и одновременного появления угрозы компрометации классических методов шифрования со стороны распределенных и квантовых вычислений [5.51], и поиск новых методов организации высокопроизводительных вычислений в связи со скорым достижением предела миниатюризации устройств на основе полупроводниковых технологий и отсутствием классических алгоритмов для быстрого решения проблем класса сложности NP (non-deterministic polynomial) [5.52].

В связи с быстрым прогрессом распределенных и квантовых вычислений, современные методы шифрования потенциально могут быть скомпрометированы. Суть проблемы обеспечения конфиденциальности передачи данных заключается в технологических факторах. Современный подход к обеспечению информационной безопасности основан на том, что расшифровка криптографических ключей занимает время, значительно превышающее срок актуальности информации. Однако безопасность систем, зашифрованных с использованием таких ключей, не является абсолютной и связана напрямую с вычислительными возможностями криптоаналитика. Сообщалось об успешном раскрытии данных, зашифрованных при помощи считавшегося надежным ключа RSA длиной 768 бит, [5.53]. От шифрования ключом длиной в 1024 бит предстоит отказаться в самое ближайшее время.

Вычисления, основанные на законах квантовой механики и процессах манипулирования квантовой информацией, могут быть экспоненциально быстрее и эффективнее, чем классические. Экспериментально продемонстрирована возможность эффективного применения квантового алгоритма быстрой факторизации чисел (алгоритма Шора [5.54]) при

помощи квантового вычислителя для взлома криптографических систем с открытым ключом со скоростью, близкой к скорости шифрования. Еще несколько лет назад создание эффективного квантового компьютера представлялось маловероятным. Однако квантовая вычислительная система канадской компании D-Wave, реализующая алгоритм квантового отжига с помощью более 500 кубит, сегодня является коммерческим продуктом, поставка которого осуществлена в NASA и Google [5.55].

Важность развития квантовых методов защиты данных подкрепляется и основными трендами развития инфраструктуры телекоммуникаций, одним из которых является переход к парадигме интернета вещей (IoT, Internet of things) [5.56]. Интернет вещей подразумевает появление нового типа абонента: автоматизированного устройства, общающегося по сети с человеком-оператором и другими устройствами. Примерами таких абонентов являются промышленные роботы, беспилотные летательные аппараты, медицинские и промышленные сенсоры, компьютерные сети. Важнейшим аспектом развития IoT является появление нового типа угроз: взлом компьютерных сетей может привести не только к утечке данных, но и к нарушению работы инфраструктуры, авариям и техногенным катастрофам.

Приведенные выше примеры показывают, что в ближайшее время использование классических шифров не сможет удовлетворить все потребности рынка в части обеспечения конфиденциальности информационного обмена. Становятся актуальными вопросы поиска других методов построения криптографических систем. Квантовые методы решают эту задачу, основываясь на фундаментальных принципах современной физики, таких как невозможность измерения квантовой системы без изменения ее состояния, невозможность клонирования неизвестного квантового состояния [5.57] и невозможность разделения квантовых объектов. В отличие от классических устройств, стойкость квантовых систем является безусловной, то есть не зависит от времени и вычислительной мощности перехватчика.

Создание квантовых сетей для передачи информации важно не только из-за проблемы безопасности. Квантовые сети помогут увеличить скорость передачи данных (за счет,

например, методов квантовой телепортации [5.58] и сверхплотного кодирования [5.59]), и значительно расширить пользовательскую базу даже на основе существующей инфраструктуры. Квантовые коммуникации также позволят объединить распределенные устройства для квантовых вычислений в единую сеть и организовать обмен данными между ними.

Тесно примыкают к созданию квантовой информационной инфраструктуры и методы квантовой обработки информации. Квантовые вычисления, благодаря своему параллелизму, значительно ускоряют решение фундаментальных и прикладных научных задач, недоступных классическим схемам. Хотя современные информационные технологии развиваются с каждым днем, и классические вычислительные мощности постоянно растут, у них есть физический предел. Квантовые вычисления позволят совершить качественный скачок при решении сложных математических задач.

Работа квантового компьютера основана на двух квантовых явлениях: суперпозиции и запутанности состояний квантовых объектов и составленных из них систем [5.60]. Именно эти две присущие квантовым объектам особенности и позволяют развить параллелизм в системе и дают прирост скорости вычислений. Так, эффективно решить проблему поиска элемента в множестве, а также задачу маршрутизации в сети, может квантовый алгоритм Гровера [5.61, 5.62]. Он способен давать квадратичный выигрыш в скорости по сравнению с классическими аналогами. Еще одним примером такой задачи является построение оптимально маршрута в классической или квантовой сети. Известно, что квантово-механические задачи лучше всего моделировать на квантово-механических системах, и, следовательно, создание подобного рода систем необходимо для решения задач квантовой физики и техники. Помимо моделирования квантово-механических систем, подобные компьютеры могут использоваться для расчета процессов и в других высокотехнологичных отраслях науки, материаловедении, нанотехнологии, биотехнологии и медицине.

Таким образом, внедрение квантовых технологий является задачей государственного масштаба, охватывающей все высокотехнологичные отрасли экономики с учетом новейших

мировых тенденций их развития. Квантовые технологии способны выступать одним из драйверов инновационного развития экономики. Основными потребителями квантовых методов передачи и обработки информации, являются:

- финансовые и банковские структуры;
- государственные и силовые структуры;
- промышленность;
- информационные технологические компании (Интернет вещей, BigData [5.63] и т. д.);
- космические и транспортные предприятия;
- научно-исследовательские центры.

5.2.2. Основные направления исследований внутри тематики и их применения

Рассмотрим основные направления исследований и разработок квантовых систем передачи информации.

Квантовая рассылка ключей (квантовая криптография)

Квантовая коммуникация в широком смысле обеспечивает связь квантовых систем. Ее история восходит к работе С. Визнера «Сопряженное кодирование» [5.64], где он показал возможность передачи информации с помощью единичных квантов света. Эта работа позднее вдохновила Ч. Беннета и Ж. Брассара на создание первого протокола квантовой рассылки [5.65].

Системы квантовой рассылки ключа (КРК), представляющие собой наиболее развитый класс устройств квантовой передачи информации, позволяют осуществлять распределение двоичных последовательностей, которые могут быть использованы в качестве симметричных ключей, между двумя (и более) пользователями. Генерация битовых последовательностей происходит путем обработки состояний квантовых систем по определенному алгоритму. На практике в системах КРК в основном используются поляризация [5.66] или фаза [5.67] однофотонного излучения. Системы КРК обеспечивают безусловную конфиденциальность передачи информации. В теории любые попытки нелегитимного поль-

зователя получить доступ к информации о ключе ведет к увеличению квантовых ошибок по битам (QBER) в соответствии с законами квантовой физики, поскольку принципиально невозможно измерить состояние фотона, не разрушив его. Если уровень ошибок в просеянной последовательности не превышает 11% (для протокола BB84), то он может быть устранен, даже если он вызван прослушиванием каналов. В противном случае канал связи блокируется.

Появление систем КРК предвосхитило реализацию квантового компьютера [5.68], который, как было указано выше, потенциально обладает более высокой вычислительной мощностью по сравнению с классическими аналогами. Системы КРК разрабатываются исходя из принципа технологической и вычислительной неограниченности возможностей нелегитимного пользователя, что учитывается при строгих математических доказательствах обеспечения защищенности [5.50].

Сегодня квантовые коммуникации активно развиваются. За последние годы были достигнуты выдающиеся показатели, которые приведены в Таблице 5.1. Видно, однако, что по сравнению к традиционными телекоммуникационными системами скорость (до 10 Гбит/с) и дальность в них пока что является невысокой.

Основные работы в области квантовых коммуникации и КРК сегодня проводятся уже в инженерной плоскости. Основная задача заключается в увеличении дальности,

Таблица 5.1 — Рекордные параметры систем квантовой коммуникации

Характеристика	Значение
Максимальная скорость генерации бит (50 км) [5.67]	2 Мбит/с
Максимальная дальность [5.69]	307 км
Максимальная скорость генерации бит в дуплексном канале [5.70]	507 кбит/с
Максимальная дальность в присутствии дуплексного канала данных [5.70]	90 км
Максимальное число узлов в квантовой сети [5.71]	10

скорости и надежности. В области теоретических исследований центральной задачей является строгое математическое доказательство безопасности конкретных протоколов и их экспериментальных реализаций. На данный момент разработано несколько «классических» подходов к анализу [5.50], но их применение к конкретным квантовым системам иногда является затруднительным. Основная проблема заключается в расхождении идеализированной теории с особенностями функционирования реальных экспериментальных схем, что требует значительного усложнения расчетов для учета несовершенства оборудования, потерь и т. п.

Кратко рассмотрим основные используемые сегодня протоколы и методы КРК. Протокол BB84 является исторически первым протоколом квантовой коммуникации [5.65], однако используется и по сей день, в том числе и в коммерческих системах, благодаря простоте реализации и доказанной надежности [5.72]. Этот протокол оперирует четырьмя поляризационными или фазовыми состояниями света в двух неортогональных базисах, и для него получены строгие доказательства защищенности [5.73]. В системе, основанной на модифицированном протоколе четырех состояний BB84 с введенными в него состояниями-ловушками, достигнуты рекордные параметры скорости КРК [5.67]. На расстоянии 35 км она составила 2,38 Мбит/с, а на расстоянии 70 км — 52 кбит/с.

Протоколы DPS [5.74] и COW [5.75] были предложены в качестве альтернативы BB84 группами экспериментаторов, которые разрабатывали практические системы для эффективной рассылки квантовых кодирующих последовательностей в оптических линиях связи на дальние расстояния. Достигнутые в этих системах дальности более 250 км длительное время являются рекордными [5.76]. Так, в разработанной авторами системе, построенной на протоколе COW, удалось достичь дальности передачи 307 км [5.69]. Преимуществами этих протоколов являются более высокая скорость генерации просеянного ключа по сравнению с протоколом BB84 и повышенная устойчивость к атаке разделением пучка для COW. Однако для них пока отсутствует полное строгое доказательство защищенности. Особенности формирования квантовых состояний в них требуют использования высокочастотной

(более 1 ГГц) управляющей электроники. В протоколе COW также возникает необходимость точного контроля времени прихода импульсов.

Стоимость и конструкцию системы КРК в существенной мере определяет детектор одиночных фотонов, неудобный вне лабораторных применений. Для преодоления этого технико-экономического барьера был предложены альтернативные способы детектирования в квантовой коммуникации — гомодинный и гетеродинный [5.77]. Квантовый сигнал смешивается с высокоинтенсивным лазерным излучением на симметричном светоделителе, а затем детектируется на двух фотодиодах. Регистрируемым сигналом для легитимного пользователя является разностный фототок. Системы КРК, использующие в качестве приемного устройства гомодинные или гетеродинные детекторы, получили название систем на непрерывных переменных [5.78]. Однако на практике системы на непрерывных переменных не могут достичь максимальных дальностей других систем [5.79]. Для них также затруднительно строгое доказательство защищенности.

В теории предполагается, что нелегитимный пользователь не имеет прямого доступа к блокам отправителя и получателя. Однако он может воздействовать на блоки опосредованно, а именно генерировать оптические состояния таким образом, чтобы изменить данные получаемые адресатом после детектирования. Для противостояния подобным атакам на квантовый канал необходима защита от подведения побочного канала к детектору. Концепция такой системы КРК, независимой от измеряющего устройства (Measurement-device independent) была предложена в работе [5.80] и развита в [5.81].

Различия между идеализированным математическим описанием протокола и его физическим воплощением в виде реального устройства накладывают ряд требований к системам КРК. При их разработке необходимо учитывать поляризационные искажения в волокне, поляризационную зависимость электрооптических модуляторов, проблему юстировки плеч интерферометров, обязательное наличие оптической синхронизации блоков и пр. Впервые эти задачи были комплексно решены в устройствах типа «Plug-and-Play» за счет двойного прохода оптического сигнала [5.82]. Именно

на архитектуре «Plug-and-Play» основана система КРК, выпускаемая компанией idQuantique [5.72]. Однако у данных систем есть и ряд недостатков, обусловленных двойным проходом излучения: в частности, наличие ограничения сверху на скорость генерации ключей и сложности обеспечения совместимости с телекоммуникационной инфраструктурой.

С точки зрения внедрения квантовых коммуникаций в существующие линии связи телекоммуникационного стандарта перспективным является метод квантовой коммуникации на боковых частотах модулированного излучения (SCW QKD). Основное отличие от аналогов заключается в том, что в системах SCW QKD сигнал выносится на боковые частоты в результате фазовой модуляции, а не генерируется непосредственно источником. Метод квантовой коммуникации на боковых частотах модулированного излучения был предложен в работе [5.83] и исследовался в [5.84–5.88]. Уникальность метода заключается в принципиальной возможности использовать практически любой фазовый протокол квантовой связи. Системы SCW обладают всеми преимуществами Plug-and-play систем, однако избавлены от их недостатков, связанных с двунаправленностью схемы. Кроме того, метод SCW позволит на порядок повысить эффективность использования полосы пропускания оптического канала связи: значение спектральной эффективности теоретические достигает 40% (по сравнению с 2–4% для других типов систем КРК [5.88]). Это достигается за счет возможности передачи нескольких квантовых каналов в окрестности сильного излучения на несущей частоте внутри одного окна DWDM [5.85, 5.87]. Помимо этого, стоит отметить простоту ввода и согласования оптической фазы в этом методе, что обеспечивает высокую видность квантового сигнала и снижает QBER. Данный метод считается наиболее перспективным с точки зрения интеграции систем квантовой коммуникации в квантовые и оптические сети.

Квантовые сетевые технологии

Большинство прикладных работ в области квантовой передачи информации посвящены обмену данными между двумя пользователями системы КРК по принципу «точка-точка»,

часто вне реальной сетевой инфраструктуры. В то же время для эффективного использования этой технологии вне лабораторных условий необходима ее интеграция с сетевыми решениями и существующими системами оптической связи. Это кардинально изменит облик квантовых коммуникаций и существенно приблизит их практическое внедрение.

Исследования в области квантовых сетевых технологий ведутся по нескольким основным направлениям:

- обеспечение передачи нескольких потоков квантовых состояний от одного или нескольких источников по одному волокну (мультиплексирование);
- передача квантовых состояний по одному волокну вместе с информационными сигналами;
- разработка специальных квантовых повторителей для увеличения предельной дальности рассылки фотонов;
- организация сетевого взаимодействия устройств квантовых коммуникаций различных типов.

Мультиплексирование квантовых каналов имеет очень большое значение для организации многопользовательского режима работы и повышения скорости обмена квантовой информацией. В работе [5.89] экспериментально продемонстрирована КРК по 3 параллельным каналам (на длинах волн 1549,32, 1550,12 и 1550,92 нм) на расстояние 45 км (общие потери в системе составили 14.5 дБ). Генерация квантовых бит успешно продолжалась в течение 12 часов, скорость генерации просеянной последовательности достигала 1 Мбит/с. Использовался протокол BB84 с состояниями-ловушками. Синхронизирующий сигнал передавался по тому же волокну, в котором происходила генерация квантовых бит. В ряде работ [5.85, 5.87] предложена интересная возможность мультиплексирования квантовых каналов в системах КРК на боковых частотах модулированного излучения. Поскольку данная методика может быть использована совместно с WDM, системы квантовой передачи информации на боковых частотах в перспективе позволят достичь на порядок более высокой спектральной эффективности по сравнению с другими подходами и существенно повысить число квантовых каналов в оптическом волокне.

В работе [5.90] экспериментально продемонстрирована одновременная передача 2 квантовых и 2 классических

каналов в одном оптическом волокне с использованием метода КРК на боковых частотах.

На сегодняшний день большинство экспериментов по КРК проводилось в «темных» волокнах. Поскольку такие волокна являются малодоступным и дорогим ресурсом, существует реальная необходимость добиться одновременного распространения квантовых и классических каналов по одному оптическому волокну. Это затрудняется сильным зашумлением квантового канала за счет комбинационного рассеяния и других эффектов излучением классического из-за различия их интенсивностей. Методы решения этой проблемы исследуются в [5.70]. На сегодняшний день было предложено применять спектральное удаление квантового канала от информационного, снижение интенсивности излучения лазера в канале данных, спектральную и временную фильтрацию. Однако вопрос эффективной передачи квантовых и классических сигналов по одному волокну пока остается открытым.

Наиболее существенным фактором, ограничивающим дальность систем квантовой передачи информации, является поглощение оптического излучения в волокне (0,2 дБ/км для длины волны 1,55 мкм). К сожалению, те же фундаментальные закономерности, которые обеспечивают безопасность передачи информации в системах КРК, препятствуют использованию в квантовых сетях традиционных усилителей оптического сигнала. Таким образом, отдельной задачей становится разработка действующих квантовых повторителей, которые позволят увеличить предельную дальность рассылки квантовых состояний. Один из наиболее успешных подходов к реализации квантовых повторителей предложен в [5.91]. Он известен как протокол DLCZ. Статья, в которой впервые освещается протокол DLCZ, породила череду довольно успешных экспериментов [5.92–5.94], основанных на применении атомных ансамблей, линейной оптики и детектировании одиночных фотонов. Однако на сегодняшний день коллективам, развивающим идею протокола DLCZ, несмотря на экспериментальные успехи в области квантовой памяти [5.95], так и не удалось осуществить экспериментально передачу состояния фотонов по линии связи через квантовый повторитель, и работа в этом направлении продолжается. Недавно предложен новый квантовый повторитель [5.96],

который основан на элементах фотоники и не использует квантовую память.

В отдельное направление сегодня выделились методы организации передачи данных в квантовых сетях, разработка их архитектур и систем управления. Поскольку эта область только развивается, то еще нет единого стандарта сетевых протоколов, сетевой архитектуры, управления и т. д.

Как отмечалось выше, на сегодняшний день существует несколько перспективных технологий квантовой рассылки ключей по наземным и воздушным линиям связи и основным направлением развития становится внедрение квантовой криптографии в существующую сетевую инфраструктуру. Экспериментальные прототипы квантовых информационных сетей созданы в Европе [5.97–5.99], США [5.71], Китае [5.100, 5.101] и Японии [5.102]. Рекордные достигнутые в мире дальность и скорость генерации ключей при передаче в сетях по волоконно-оптическому кабелю составляют 90 км и 300 кбит/с соответственно [5.103].

Исторически первая квантовая сеть была создана в США в рамках DARPA в 2002 году [5.71]. По состоянию на 2007 год сеть включала 10 узлов со средним расстоянием между ними 35 км (максимальная дальность 55 км). Генерация ключа проводилась со скоростью 1 кбит/с, коэффициент квантовых ошибок составлял не более 3%. Более свежая информация о технических характеристиках сети в открытой печати отсутствует. DARPA является крупнейшей в мире на сегодня квантовой сетью.

В 2004 году коллективами нескольких лабораторий Евросоюза был запущен проект SECOQC [5.97]. Сеть состоит из 6 узлов со средним расстоянием между ними 25 км (максимальная дальность 83 км). Генерация ключа проводилась со скоростью 10 кбит/с, коэффициент квантовых ошибок составлял не более 2,6%. Проект объединил более 40 научных организаций и промышленных предприятий. В число задач проекта входила разработка сетевых протоколов для функционирования различных систем квантовой криптографии и их взаимодействия с сетевым оборудованием. Несомненным достижением явилось объединение наиболее перспективных разработок в области квантовой криптографии в единую сеть: в проекте использовались Plug-and-play



Рисунок 5.10 — Узлы сети SwissQuantum в Швейцарии (Женева, ЦЕРН)

Источник: [5.75]

системы, системы на непрерывных переменных, системы с дифференциальным фазовым сдвигом и один канал для открытого пространства. Следующим этапом разработки стал запуск сети SwissQuantum (2009–2011), состоящей из трех узлов, удаленных на 17 км (Рисунок 5.10). Битовая скорость генерации ключа составила 0,9 кбит/с при коэффициенте квантовых ошибок 2%. В сети продемонстрирована рассылка квантового ключа и передача информации в сложной инфраструктуре и продемонстрирована долгосрочная работоспособность систем квантовой криптографии в операционной среде (более полутора лет).

В 2011 в Японии исследовательским центром Toshiba была запущена квантовая сеть [5.102] (см. Рисунок 5.11). Она включает 6 узлов со средним расстоянием 45 км (максимальное 90 км). Задачей проекта была демонстрация возможности потокового шифрования в квантовой сети на средних дистанциях. Данная сеть демонстрирует рекордные параметры благодаря использованию современного оборудования с высокими техническими характеристиками. На расстоя-

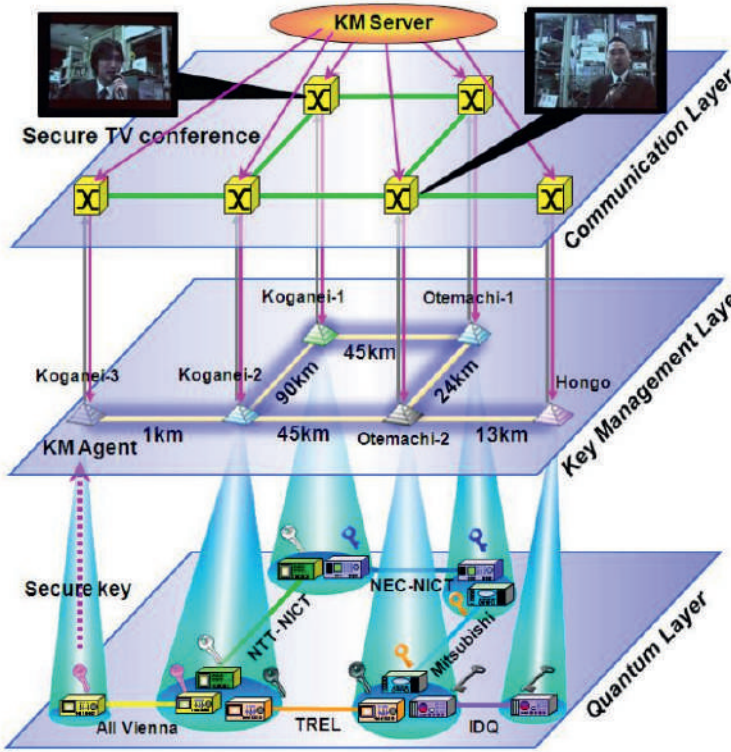


Рисунок 5.11 — Схема уровней квантовой сети Toshiba.

Источник: [5.102]

нии 45 км битовая скорость генерации ключей составляет до 1 Мбит/с при коэффициенте квантовых ошибок 3%, что позволило впервые использовать квантовое шифрование видеопотока в реальном времени. В работе также был развит подход к построению многоуровневой архитектуры квантовой сети.

Ведутся работы по созданию национальной квантовой сети в Китае [5.100, 5.101]. В мае 2009 года в городе Уху был продемонстрирован первый сегмент, состоящий из четырех узлов. В основе сети лежат оригинальные запатентованные схемы КРК, основанные на интерферометрах

Фарадея-Майкельсона. Квантовая сеть Уху является иерархической и использует городские коммерческие телекоммуникационные волокна в качестве каналов связи. В ней была успешно проведена демонстрация возможности построения многоуровневых квантовых сетей на основе технологии PON. Данный проект получил развитие в 2011–2014 годах, когда квантовыми коммуникациями были соединены три города: Хэфэй, Чаоху и Уху. Общая длина волоконной линии составляет почти 200 км, из них между разными городами 150 км.

В 2014 году в России было объявлено о создании первой квантовой сети в Университете ИТМО [5.104]. Эксперимент по распределению просеянных ключей проводился в проложенном под землей оптическом кабеле телекоммуникационного стандарта, соединяющем корпуса университета. В квантовом канале использована длина волны 1550 нм, суммарные потери в линии составляли 1,5 дБ. В экспериментах, выполненных на основе системы квантовой коммуникации на боковых частотах (SCW QKD), достигнута скорость генерации ключа 250 кбит/с при коэффициенте квантовых ошибок (QBER) 2%.

В рамках перечисленных проектов разрабатывались и квантовые сетевые протоколы, обеспечивающие обмен данными между устройствами КРК, расположенными в одном или соседних узлах. Результаты работ описаны в [5.71, 5.97–5.103]. Можно выделить следующие основные тенденции в данной области:

- деление квантовой сети на иерархические уровни: в общем случае на квантовый, транспортный, сетевой, уровень приложений;
- работа всех устройств КРК (независимо от архитектуры) по специальному сетевому протоколу, например, Q3P;
- внешняя обработка данных, то есть отчуждение от системы КРК любых функций, кроме генерации сырого ключа;
- увеличение дальности рассылки ключей с помощью парадигмы недоверенных ретрансляторов [5.97].

Другие приложения квантовых коммуникаций

Основное внимание в области квантовой передачи информации уделяется КРК и отрабатываемым на их основе технологиям квантовых сетей. Однако свойство квантовой запутанности помогает не только при решении проблемы реализации квантовых повторителей. Например, запутанность используется для получения изображения в определенном спектре частот (квантового имаджинга), при этом детектируется квантовый сигнал, лежащий вне заявленного спектра [5.105]. Несколько других примеров применения запутанности в сфере квантовых коммуникаций,— квантовая телепортация, сверхплотное кодирование и квантовая цифровая подпись [5.106]. Также квантовое запутывание может быть применено для реализации протокола квантовой криптографии. Примером может служить протокол E91 [5.107].

Квантовая связь основана на кодировании битов с помощью единичных фотонов. В современных системах квантовой связи эти фотоны передаются напрямую по оптоволоконному каналу. Основная проблема в том, что в таких каналах половина фотонов теряется каждые 10–15 км. Это естественным образом ограничивает практическую дальность передачи данных. Эту трудность можно обойти, если не передавать фотоны напрямую, а телепортировать их. Под квантовой телепортацией понимают мгновенный перенос состояния с одного квантового объекта на другой, запутанный с ним. Идею квантовой телепортации предложили Чарльз Беннетт и Жил Брассард в 1993 году [5.108], а первенство экспериментальной реализации оспаривают между собой группа Франческо Де Мартини [5.109] и группа Антона Цайлингера [5.110]. Первые эксперименты были поставлены с использованием фотонов, а кодирование происходило на поляризации. Основной принцип, на котором построена телепортация, заключается в следующем: генерируется пара запутанных фотонов, один из которых отправляется Алисе, а другой Бобу. Помимо этой пары у Алисы имеется кубит, который требуется передать. После того, как один фотон из запутанной пары оказывается у Алисы, она использует его для измерения своего кубита в базисе Белла, после чего передает информацию в виде 00, 01, 10 или 11 Бобу,

который, применяя идентичное преобразование, получает копию изначального кубита Алисы. На сегодняшний день для телепортации используются не только фотоны, но и частицы и даже ансамбли частиц. Например, существуют эксперименты, в которых задействованы более 1000 атомов в состоянии конденсата Бозе-Эйнштейна [5.62, 5.63]. Дальность передачи данных также существенно возросла, для передачи информации по оптоволокну она составляет 102 км [5.58], а абсолютный рекорд дальности составляет 143 км и был проведен на открытом пространстве [5.111]. Принцип квантовой телепортации используется, и в протоколах квантовой аутентификации [5.112].

Сверхплотное кодирование — кодирование двух бит классической информации с помощью одного квантового бита. Не исключено, что именно сверхплотное кодирование послужит отправным пунктом для дальнейшего развития квантовых коммуникаций. Впервые идею сверхплотного кодирования предложили в 1992 году Чарльз Беннет и Стив Уиснер [5.59]. В его основе также лежит запутанность. Долгое время ученые не могли экспериментально достигнуть передачи двух бит информации на одном фотоне, однако, в итоге, этого удалось достигнуть группе под руководством Пола Квята в 2008 году [5.113].

Группа Квята воспользовалась более сложной формой запутанности, известной как гиперзапутанность (запутанность более чем одним способом). Ученые смогли передать данные с плотностью 2 бита на фотон. Сверхплотное кодирование предложенным методом основывается на передаче «отклоняющейся» полярности обоих фотонов и ее «скручивании», то есть, на орбитальном угловом моменте. Для этого на паре нелинейных кристаллов выполняется спонтанное параметрическое преобразование с понижением частоты, благодаря чему создается эффект двойной параметрической гиперзапутанности. Затем данные передаются с одного фотона на другой посредством изменения поляризации с помощью сдвигов по фазе с использованием двулучепреломляющих жидких кристаллов.

Элементная база квантовых коммуникаций

Очевидно, что для работы с квантовыми сигналами необходимо их эффективно получать и детектировать. По этой причине специалистами по квантовой технике много внимания уделяется разработке эффективных источников и приемников однофотонного излучения.

В идеальном случае источник квантовых состояний должен одновременно обеспечивать истинно однофотонную статистику, быть детерминированным, быстрым и работающим вне лабораторных условий. Существует огромное количество подходов к реализации источников фотонов, основанных на переходах в атомах, нелинейных параметрических процессах и других эффектах, подробно описанных в [5.49, 5.114].

На данный момент известно несколько типов детерминированных источников двухфотонного излучения, например, [5.115], где детектирование одного из фотонов говорит о том, что в квантовый канал отправился второй. Полученные фотоны разгруппированы, это означает, что вероятность многофотонного состояния стремится к нулю. Нанокристаллические квантовые точки [5.116], алмазные нанокристаллы с центрами окраски [5.117] и источники, основанные на спонтанном параметрическом рассеянии [5.118, 5.119] являются самыми перспективными для применения при комнатной температуре. На данный момент они по большей части доступны только в лабораторных условиях, хотя некоторое количество устройств уже есть в продаже [5.120]. Однако эта технология еще развивается и не может обеспечить высокий темп генерации фотонов. Для таких устройств всегда приходится находить компромисс между скоростью излучения фотонов и близостью к истинному источнику одиночных фотонов.

Тривиальным и простым в использовании (а также сравнительно дешевым) решением проблемы поиска источника одиночных фотонов является использование ослабленного до критического уровня лазерного излучения со средней энергией в импульсе или временном отсчете меньшей, чем энергия одного фотона. Малое среднее число фотонов в среднем импульсе (меньше единицы) позволяет добиться квазиоднофотонного излучения. Существует вероятность излучения

более одного фотона в одном импульсе или временном отсчете источником когерентных состояний, статистика которого подчиняется распределению Пуассона. Хотя использование источника когерентных состояний является временным решением проблемы, необходимо учитывать специфику когерентных состояний при разработке протоколов КРК [5.121].

Испущенные квантовые сигналы необходимо регистрировать. В качестве измерительного прибора в квантовой оптике выступают детекторы одиночных фотонов. Идеальный детектор отличают:

- 100% квантовая эффективность (полное соответствие электронного сигнала оптическому);
- отсутствие темновых отсчетов (срабатывания детектора при отсутствии сигнала);
- отсутствие времени восстановления (неработоспособности детектора в небольшой промежуток времени сразу после детектирования, связанной с релаксационными процессами);
- отсутствие временного джиттера (вариаций временны́х промежутков между приходом оптического сигнала и выходом электрического от сигнала к сигналу).

Дополнительно можно выделить различение количества детектируемых фотонов, со 100% точностью в идеальном случае. Общим принципом для всех детекторов является преобразование слабого однофотонного сигнала в электрический. Инженерные решения направлены на максимально возможное приближение того или иного параметра к идеальному значению соответственно конкретной поставленной задаче [5.49].

Еще одним важным элементом систем квантовой передачи информации является квантовая память [5.122, 5.123], которая, при достижении высоких параметров, позволит хранить и передавать по запросу квантовое состояние и может лечь в основу квантовых повторителей. На текущий момент наиболее перспективны устройства на базе микрорезонаторов [5.124], ансамблей атомов [5.125] или на принципе фотонного эхо, применение которого впервые было предложено специалистами КФТИ и ККЦ [5.126] и легло в основу текущих рекордов в области квантовой памяти.

Передовые исследования в области квантовых вычислений ведутся Сколковским институтом науки и технологий в рамках Исследовательского центра по Фотонике и квантовым материалам, в том числе исследуется применение квантовых вихрей [5.127] и перспективных материалов [5.128] для задач квантовой информатики, фотоники, коммуникаций, что позволит создать высокопроизводительные прикладные квантовые вычислительные системы нового поколения.

Моделирование квантовых систем и устройств

Одной из основных теоретических задач в квантовой коммуникации (помимо анализа систем КРК с точки зрения теории информации) является расчет квантовых информационных систем. Для дальнейшего развития квантовых вычислений и квантовых коммуникаций необходимо разработать эффективные методы теоретического моделирования квантовых систем и расчета параметров элементов квантовых схем.

В качестве простого примера можно привести работу светоделителя [5.129]. На его основе оказывается возможным реализовать квантовые генераторы случайных чисел (КГСЧ) различных архитектур [5.130]. Если оптическое излучение подавать только на один из входов, то согласно квантовому формализму на второй вход все же поступает вакуумный квантовый сигнал, который можно измерить с помощью гомодинного детектирования. Ввиду стохастического характера квантовых процессов измеренный сигнал будет являться фундаментально случайным.

Актуальной является и задача расчета более сложных классических приборов, которые взаимодействуют с квантовыми сигналами. Например, обсуждается модель квантового описания фазовых модуляторов [5.131, 5.132], поскольку они используются для кодирования информации в системах КРК и для создания квантовых сигналов на боковых частотах [5.83, 5.88]. Полностью квантовое описание процессов позволит учитывать новые эффекты, которые не предсказывает классическая теория. Однако различные подходы к этой проблеме дают разные результаты, что требует тщательной экспериментальной проверки.

Большие усилия направлены на моделирование работы квантовых вычислительных элементов и разработку реализующих их оптических схем [5.133, 5.134]. Проведение точных расчетов необходимо для выбора оптимальной технологии их создания. Возможности таких «квантовых чипов» не ограничиваются только вычислениями: в работе [5.135] впервые реализована компактная схема квантовой телепортации на оптическом чипе.

Еще одной областью теоретических исследований являются поиски новых методов проведения квантовых измерений. Известно, что в общем виде квантовое измерение изменяет состояние квантового сигнала; именно на этом принципе основана квантовая криптография [5.136]. Однако уже разработан способ проводить неразрушающее квантовое измерение, которое способно дать информацию о количество фотонов в слабом световом импульсе без изменения их параметров [5.137]. Поиск и реализация подобных способов измерений является актуальной задачей.

5.2.3. Научные и технологические барьеры развития области

Прогресс в области квантовой передачи информации существенно замедляется из-за существования большого количества научно-технических барьеров. Большинство из них напрямую связано с квантовыми свойствами носителей информации — то есть недостатки квантовых систем проистекают из того же источника, что и их преимущества перед классическими. Другой блок проблем, возникающих в экспериментальных реализациях, связан с несовершенством применяемого оборудования и технологий. Рассмотрим основные трудности, на преодоления которых в настоящее время направлены усилия коллективов во всем мире.

Невысокая скорость и дальность систем квантовой коммуникации. Сравнение параметров систем классических коммуникация (скорости до 100 Гбит/с и условно неограниченная дальность за счет повторителей) с лучшими квантовыми аналогами, выявляет значительный разрыв в их характеристиках. Основными причинами его являются вероятностный характер измерений в протоколах КРК, низкая эффектив-

ность детекторов фотонов и необходимость поддерживать энергию излучения в квантовом канале на однофотонном уровне.

Потери в оптическом волокне растут экспоненциально с увеличением его длины. Поэтому, когда в волокне распространяются сигналы с энергией порядка энергии одиночных фотонов, крайне сложно добиться высоких дальностей передачи данных. На сегодняшний день лучшие лабораторные образцы систем КРК едва преодолели порог дальности 300 км при скоростях порядка 1 бита в секунду. Таким образом, в условиях отсутствия квантовых повторителей потери ограничивают скорость передачи. В результате существенно возрастают требования к скорости и точности работы управляющей электроники в блоках отправителя и получателя систем КРК. На сегодняшний день в квантовых коммуникационных системах технологический предел находится на уровне нескольких Гигагерц [5.138]. Отметим при этом, что современный уровень развития технологий позволяет осуществлять обмен квантовой информации с Земли на спутник, так как потери оптического излучения в атмосфере малы.

Низкая спектральная эффективность систем квантовой коммуникации. Другой актуальной задачей в квантовой коммуникации является решение проблем малой спектральной эффективности систем квантовой связи. Действительно, рекордные значения скорости квантовой связи на расстоянии 50 км не превышают 1–2 Мбит/с. Использование DWDM-мультиплексирования 40 таких каналов гипотетически позволит развить скорости до 80 Мбит/с в одном волокне. В то же время, стандартом связи в системах оптических коммуникаций является 10 Гбит. Таким образом, спектральная эффективность использования полосы пропускания оптического канала составляет не более 4–8%. При этом сегодня ожидается переход на 100 Гбит. Как отмечалось выше, одним из возможных способов повышения спектральной эффективности является использовании систем квантовых коммуникаций на боковых частотах модулированного излучения.

Отсутствие квантовых повторителей. Как уже упоминалось, на разработку квантовых повторителей направлены большие усилия, так как их отсутствие является центральным ограничивающим фактором в квантовых коммуникациях.

Основные трудности в этом направлении связаны с отсутствием эффективной квантовой памяти и декогеренцией фотонов.

Отсутствие эффективных источников и приемников одиночных фотонов. Несмотря на то, что квантовая оптика имеет более длительную историю, чем квантовая информатика, источники и приемники одиночных фотонов пока не достигли предела своих возможностей. Как правило, при создании источников разработчикам приходится искать компромисс между быстродействием устройств, равномерностью свойств излучения и «чистотой» квантовых состояний. Так, в большинстве экспериментов по КРК используется ослабленное лазерное излучение, поскольку сегодня еще не созданы источники фотонов, работающие на частотах в несколько сотен Мегагерц [5.138]. Лучшие приемники фотонов, одновременно обладающие низким уровнем темновых отсчетов (~10 Гц), малым джиттером (100 пс) и высокой скоростью счета (до 1 ГГц) основаны на сверхпроводниковых технологиях [5.138, 5.139, 5.140] и требуют поддержания температур порядка 2К, что является неудобным при эксплуатации систем квантовых коммуникаций вне лабораторных условий и увеличивает их стоимость. Кроме того, их квантовая эффективность сильно взаимосвязана с уровнем темновых отсчетов и при оптимальном соотношении составляет всего порядка 10–20%. Недавно была опубликована работа [5.141], в которой описывается лавинный фотодетектор со схожими характеристиками, но более приспособленный для практических применений,

Атаки на квантовый канал, использующие несовершенство устройств. В теории системы КРК способны обеспечивать безусловную безопасность передаваемых и их помощью данных. Однако на практике эти системы имеют различные уязвимости, причем их особенности напрямую зависят от архитектуры и используемого оборудования. Например, в работе [5.142] был продемонстрирован «взлом» коммерческой системы КРК фирмы idQuantique с помощью ослепления детектора сильными лазерными импульсами. Несмотря на то, что эта уязвимость была впоследствии ликвидирована, этот эксперимент открыл широкую дискуссию о надежности практических методов квантовой криптографии.

Следует также упомянуть, что при анализе стойкости квантовых коммуникационных систем все регистрируемые пользователями ошибки (QBER) принято относить к действиям злоумышленника. По этой причине крайне важной является минимизация инструментального вклада в QBER, который в современных системах остается достаточно высоким (1–2% при предельном значении 11%) [5.136].

Вероятностный характер срабатывания квантовых вычислительных схем. Несмотря на создание квантовых алгоритмов и разработку различных технологий по построению элементной базы квантовых компьютеров, полноценного квантового процессора до сих пор не существует. Это в значительной степени обусловлено тем, что в полной мере не реализованы базовые вычислительные элементы, так как при их построении приходится учитывать вероятностный характер срабатывания квантовых схем. Он заключается в том, что квантовая вычислительная схема реализует с заданными вероятностями каждый из возможных вариантов преобразования квантового объекта при ее прохождении. Таким образом, квантовая схема действует как конкретный логический элемент лишь с определенной вероятностью [5.143]. Вероятностное срабатывание схем приводит к необходимости использования процедур постобработки и их существенному усложнению.

По этой причине пока не создан практически применимый оптический вентиль CNOT, без которого невозможны более сложные схемы. Существующая реализация вентиля CNOT в виде линейной оптической вычислительной схемы имеет вероятность верного срабатывания 1/9, что дает крайне низкую эффективность при необходимости их последовательного соединения для реализации более сложных схем.

Для решения этой проблемы сегодня предложены устройства, являющиеся гибридом квантового и классического устройства, способные решать отдельные задачи быстрее классических аналогов [5.144].

Сложность поддержания стабильности взаимосвязанных квантовых объектов. Эта проблема является основным препятствием к созданию квантовых логических схем. Поскольку взаимодействие с классическим объектом ведет к коллапсу волновой функции и изменяет состояние квантовой

системы, любое нежелательное взаимодействие с внешней средой будет приводить к разрушению квантового состояния в результате декогеренции [5.112].

Практическая реализация квантовых алгоритмов с высокой точностью затруднена быстрым ростом уровня декогеренции при увеличении количества структурных элементов. Сегодня в теории предложены экспериментальные схемы различных квантовых алгоритмов, однако, все они достаточно сложны в реализации и имеют вероятностный характер срабатывания. Для компенсации вероятностного характера квантовых схем необходимо использовать алгоритмы квантовой коррекции ошибок, что еще сильнее усложняет схему. Реализация эффективных и быстрых алгоритмов квантовой коррекции ошибок для выбора верных решений пока не разработана. Наконец, в оптических схемах по мере возрастания количества квантовых объектов растут потери, что вносит дополнительный вероятностный фактор в работу квантовой схемы.

К основным средствам решения данной проблемы можно отнести:

- оптимальный выбор физической реализации кубитов;
- управление кубитами с высокой точностью;
- создание однокубитовых и двухкубитовых операторов с высокой точностью;
- создание кластеров с большим числом кубитов;
- создание квантовых интерфейсов для управления большим числом кубитов.

Исходя из того, что кубит является основополагающим понятием во всей квантовой теории информации, то необходимо определиться с каком типом физической реализации кубитов целесообразно работать. Так, наиболее эффективная изоляция квантового объекта от внешней среды может быть достигнута в атомарных системах с помощью специальных квантовых ловушек. Компонентная база, на основе которой можно строить квантовые вычисления и квантовое моделирование сейчас достаточно велика и развивается очень быстро. На сегодняшний день их существует несколько вариантов:

- нейтральные атомы в оптических ловушках [5.145];
- NV-центры в кристалле алмаза [5.146];

- квантовые точки в полупроводниках [5.147];
- сверхпроводящие кубиты [5.144];
- линейные оптические схемы, использующие поляризацию или фазу фотона [5.148].

Каждый из приведенных методов физической реализации кубитов получил достаточно широкое распространение и развитие, но оптимальный вариант пока так и не найден. Однако, стоит отметить, что наибольшей популярностью сегодня пользуются сверхпроводящие кубиты. С их помощью сконструирован квантовый компьютер D-Wave 2X [5.55], способный решать определенные задачи намного быстрее любых классических суперкомпьютеров, но вопрос о том, можно ли назвать его истинно квантовым, остается открытым до сих пор. Несмотря на это, ведущие мировые лидеры в области вычислений и обработки информации, такие как Google, приобрели данный квантовый компьютер, что лишний раз подчеркивает интерес к данному направлению. В виду того, что вопрос об оптимальной физической реализации кубита так и не решен, все остальные проблемы также остаются открытыми.

5.2.4. На каких временных горизонтах и в каких направлениях можно ожидать применения и коммерциализации описываемых новых технологий

Из всех приложений квантовых технологий на сегодняшний день наиболее развитыми являются технологии квантовых коммуникаций. Как уже было сказано выше, применение квантовых эффектов в телекоммуникациях, в первую очередь, открывает новые возможности по созданию защищенных каналов связи.

Уже сейчас число патентных публикаций в области квантовых коммуникаций превышает 3000. Свои патенты в данной области имеют такие гиганты телекоммуникационной индустрии как IBM, NEC, Microsoft, Google, а также признанные компании-лидеры в области квантовых технологий: ID Quantique, MagiQ, Toshiba. В России разработками в области квантовых технологий занимаются несколько коллективов (см. ниже), растет число публикаций и патентов по данной

тематике, создаются специализированные коммерческие компании (ООО «Квантовые коммуникации»).

На сегодняшний день в мире уже запущенно более 30 проектов квантовых коммуникационных систем различного характера: от научных исследований до коммерческого использования. В США и Евросоюзе ведется работа по стандартизации квантовых сетей и устройств. Первые многоузловые квантовые сети уже были продемонстрированы в США, Китае, Японии и Евросоюзе. В рамках этих проектов были решены следующие задачи [5.97–5.102]:

- созданы первые опытные районы квантовых сетей;
- сформулированы подходы к организации квантовой рассылки ключа в сетевом режиме со статической маршрутизацией без использования квантовых повторителей;
- в единой сети объединены системы квантовой коммуникации различных типов;
- продемонстрирована возможность использования систем КРК в сетевом режиме и достаточная временная стабильность квантовой сети (1 год);
- продемонстрирована принципиальная возможность передачи данных и рассылки ключей по одному волокну;
- выполнена передача видеопотока, закодированного ключом, полученным с помощью КРК.

В то же время, как отмечают эксперты, на сегодняшний день системы квантовых коммуникаций еще не окончательно готовы к внедрению в телекоммуникационные сети, поскольку не найдены эффективные решения нескольких практически важных задач [5.97–5.102]:

- обеспечения эффективной маршрутизации в квантовых сетях;
- повышения спектральной эффективности систем квантовой коммуникации;
- совмещения устройств квантовой коммуникации с существующими стандартами и системами связи телекоммуникационного стандарта, масштабирования квантовых сетей,
- разработки квантовых повторителей и маршрутизаторов;
- синтеза квантовых коммуникаций с другими новыми сетевыми решениями.

Предполагается, что в ближайшие 5–10 лет будут найдены эффективные решения для указанных выше задач, что позволит окончательно внедрить технологии квантовых коммуникаций для специальных нужд (банковской, военной и т. д.) и в отдельных регионах (городах, областях).

В среднесрочной перспективе можно будет обеспечить наличие защищенных сетей, связывающих офисы и телекоммуникационные станции на более обширной территории. Что касается долгосрочной перспективы развития глобальных квантовых систем коммуникации, то они смогут быть реализованы посредством использования оптоволокна в ретрансляторах или при помощи спутников. Управление и стандартизация будущих систем квантовых коммуникаций должны будут сыграть важную роль в обеспечении уверенности клиентов в надежности квантового шифрования.

В области квантовых вычислений на настоящий момент существует ограниченное число квантовых алгоритмов, направленных на решение вычислительно-сложных NP, PP и#P-задач [5.52]. В ближайшие 10 лет ожидается дальнейшее развитие квантовых алгоритмов для обработки большого объема данных, машинного обучения, поиска информации. Квантовые компьютеры должны будут на несколько порядков превзойти по производительности свои классические аналоги. Для их развития и широкого практического применения и коммерциализации в будущем, в настоящее время ученым необходимо решить ряд важных фундаментальных и прикладных задач.

Сейчас в сфере квантовых вычислений, самой известной и наиболее успешной является компания D-Wave, работающая в коллаборации с Google, NASA и университетами США и Канады. Проекты, использующие квантовые компьютеры D-Wave, нацелены на исследования искусственного интеллекта, медицины, квантовых коммуникаций, квантового программирования. В июле 2015 года D-Wave заявила о преодолении барьера в 1000 кубит. Ряд ученых, однако, подвергают сомнению сообщения об увеличения производительности квантовых компьютеров D-Wave по сравнению с классическими. Тем не менее, квантовый компьютер D-Wave как первое подобное устройство на рынке очень полезен в квантовых исследованиях и разработках, которыми занимаются заинтересованные организации.

Предполагается, что дальнейшие разработки квантового компьютера будут продолжаться еще 10–20 лет, прежде чем конечный продукт попадет на рынок для коммерческой реализации. Так, в будущем квантовые компьютеры будут наиболее эффективны в алгоритмах машинного обучения, распознавании образов, оптимизации процессов (максимизации прибыли от финансовых операций), перемещении товаров в сети, а также решении сложных задач моделирования (квантовых вычислениях). Уже сейчас, вместе с решением ряда научных задач в создании квантовых компьютеров, требуется некоторая степень стандартизации разработок для обеспечения более целенаправленных исследований технологии для того, чтобы получить поддержку крупных компаний.

5.2.5. Оценки текущего и потенциального спроса для практических применений

Рынок квантовых вычислительных устройств на данный момент не развит в связи с тем, что текущие разработки еще не вышли за пределы научных лабораторий. Единственной компаний, заявляющей о разработке конечного устройства, реализующего квантовые вычисления, является D-Wave. Спрос на эту разработку есть со стороны Google, NASA, университетов США. Эти организации сейчас занимаются поиском сферы применения технологий квантовых вычислений в космической области, занимаются развитием квантовых алгоритмов, а также разработкой квантово-классических гибридных систем.

Поскольку рынок квантовых коммуникационных систем еще не сформировался, прогнозы маркетинговых исследований связаны с анализом рынка виртуальных частных сетей (VPN), которые в настоящий момент в основном обеспечивают защищенную передачу информации, и в недалеком будущем будут замещаться системами квантовой передачи информации. По оценкам маркетинговых агентств, глобальный рынок квантовых коммуникационных систем в 2018 году достигнет 1 млрд. долл. США.

Рынок квантовых коммуникаций рассматривается как находящийся на этапе интенсивного роста. По данным Global

Industry Analysts, Inc., (GIA) глобальный рынок квантовой криптографии является динамично развивающимся и, движимый потребностью повышения безопасности коммуникаций, достигнет в 2018 году уровня в $1 миллиард. Совокупный рынок квантовых вычислений в 2015–2020 годах по прогнозам Market Research Media достигнет $26 миллиардов. Мировой рынок систем квантовой рассылки ключей фактически формируют несколько компаний: MagiQ, США [5.151] и ID Quantique, Швейцария [5.72], SequreNet, Франция [5.150], Toshiba, Япония [5.151]. Эти фирмы позиционируют свой продукт как предназначенный исключительно для научных исследований в области квантовой информатики. В России устройства квантовой рассылки ключей находятся на завершающей стадии НИОКР. В 2013 году объем мирового рынка программных средств безопасности вырос до 19,9 млрд. долл., что на 4,9% больше, чем в 2012 году. Мировыми лидерами в квантовых коммуникациях являются университеты Великобритании, Швейцарии и Канады. Новая квантовая программа Великобритании была запущена в январе 2014 года.

Цель программы — выход в мировые лидеры квантовых технологий путем объединения усилий ведущих вузов страны. Среди исследовательских центров выделяются четыре потенциальных лидера — Оксфорд, Бирмингем, Глазго и Йорк. Среди приоритетных сфер исследования — квантовые устройства, компоненты и системы, квантовая оптика и информатика, оптические устройства и подсистемы, оптические коммуникации.

К значимым европейским квантовым центрам также стоит отнести институт им. Макса Планка в Германии, группу Ф. Гранье (University Paris-Sud), работающая над квантовой криптографией на непрерывных переменных, группу исследователей из Китая (University of Science and Technology of China), которым принадлежит рекорд по дальности рассылки криптографического ключа по стандартному оптическому волокну на основе протокола дифференциального фазового сдвига.

5.2.6. Ключевые проекты в компаниях: в мире и в России

Поскольку квантовая передача информации рассматривается в мире в качестве перспективной области, в последние 10–15 лет было налажено активное сотрудничество между научными лабораториями, инвестиционными фондами, государственными и коммерческими компаниями. Отмечается также активное международное сотрудничество.

США

DARPA создали первую квантовую сеть в 2001, при участии Гарвардского университета, Бостонского Университета и BBN — организации, сотрудничающей с DARPA в военном секторе. Battelle совместно с ID Quantique, Google, IBM, Microsoft, Rackspace и Amazon строят национальную квантовую сеть в США. Завершение проекта планируется к 2018 году. Компания MagiQ — главный конкурент ID Quantique в США — предоставляла QPN для квантовой сети DARPA в Бостоне, а также была привлечена и к другим проектам DARPA.

Европа

В Европе располагается крупнейшая на рынке квантовых коммуникаций компания ID Quantique. Компания была основана в 2001 году в Швейцарии на базе университета Женевы, где в 2009 году было начато масштабное тестирование крупнейшей квантовой сети SwissQuantum. Эксперимент продолжался 2 года и был признан успешным. В проекте участвовали 12 организаций, включая ID Quantique.

Великобритания

Эта страна является одним из крупнейших в мире инвесторов в квантовые исследования, и в течение последних двух десятилетий в стране сформировалось активное академическое сообщество. Квантовая программа Великобритании была запущена в январе 2014 года. Цели программы — выход в мировые лидеры квантовых технологий путем объединения усилий ведущих вузов страны. Исходя из этого можно сделать вывод, что английская квантовая программа нацеле-

на на поиск инженерных решений под существующую теоретическую базу и на скорейший вывод технологий на рынок потребления. Государственный бюджет британской квантовой программы составляет около $409 млн.

Китай

Главный проект в сфере квантовых технологий в Китае — национальная квантовая сеть Пекин–Шанхай протяженностью 2000 километров. На данный момент, этот проект по амбициозности готов соперничать с американской квантовой сетью. Оценочная стоимость проекта составляет $15 млн. на 10 000 пользователей. Организаторы проекта — китайская академия наук и научно-технический университет Китая. Кроме национальной квантовой сети, к 2016 году Китай планирует создать квантовую спутниковую связь Пекин–Вена.

Япония

Токийская квантовая сеть появилась в 2011 году. Участниками сети являются ведущие японские организации и исследовательские центры: Национальный Центр Информации и Связи, NEC Corporation, Mitsubishi Electric, NTT Corporation, а также id Quantique, Австрийский Технологический Институт, Институт Квантовой Оптики и Информатики (Австрия) и Институт Вены.

Россия

Разработки в области квантовой передачи информации в России находятся на стадии фундаментальных и прикладных исследований, выполняемых в основном университетами на основе государственного финансирования.

На российском рынке появляются коммерческие образцы систем квантовой коммуникации (ООО «Квантовые Коммуникации»). Со стороны коммерческих компаний наибольший интерес проявляют операторы услуг связи — такие, как «Ростелеком» и производители оборудования («Супертел»). О проведении работ по созданию квантовых коммуникационных сетей на сегодняшний день публично объявили Университет ИТМО и Российский квантовый центр.

5.3. Оптические методы хранения информации

5.3.1. Введение

Хранение больших объемов информации представляет наряду с такими глобальными проблемами, как перенаселение и изменение климата, одну из актуальных и системных задач XXI века. Решение этой задачи, с одной стороны, требует развития и внедрения новых технологий создания энергонезависимых физических носителей информации, а с другой — обеспечения доступа к информационным ресурсам, такими как дата-центры и облачные сервисы. В обоих случаях ключевым аспектом является хранение данных, объем которых к 2020 году вырастет, по разным оценкам [5.152–5.155], до несколько десятков Зеттабайт (1 Зб = 10^{21} Б (байт)). Ежегодно совокупный объем данных удваивается. Например, при работе телескопа (Harlingten) в австралийской обсерватории на юге штата Тасмания генерируется 700 Тб (10^{12} Б) ежедневно [5.152]. Благодаря масштабному внедрению облачных технологий взрывной рост объема данных приводит к смещению спроса от мобильной памяти к стационарной [5.153].

В 2014 году всеми производителями было выпущено 560 млн. жестких дисков (Hard Disk Drive — HDD) общей емкостью 1 Зб [5.152]. Тем не менее, спрос на хранение данных значительно превосходит текущее рыночное предложение производителей HDD и SSD (Solid-State Drive) (см. Рисунок 5.12), несмотря на то, что плотность записи данных увеличивалась в среднем на 40% в год, опережая темпы роста степени интеграции транзисторов [5.156]. В 2012 году технология перпендикулярной магнитной записи достигла фундаментального (суперпарамагнитного) предела — поскольку для увеличения плотности записи необходимо уменьшать размер магнитного домена на жестком диске. Вместе с этим увеличивается коэрцитивность магнитного материала, которая приводит к необходимости прикладывать достаточно сильные магнитные поля, чтобы эффективно ориентировать магнитные моменты на диске и, соответственно, кодировать информацию. Однако применяемые поля значительно превышают магнитное насыщение используемых для записывающих головок CoFe электромагнитов.



Рисунок 5.12 — Динамика темпа роста спроса и предложения физических носителей памяти.

Источник: [5.156]

Катализатором развития технологий хранения данных в ближайшие 10–20 лет станет Интернет вещей (Internet of Things) [5.154], объединяющий в информационную сеть не только людей, но и окружающих их «умные» предметы (устройства). Несмотря на то, что спрос на хранение данных растет, развитие технологий происходит более медленными темпами. В частности, хранилище на основе жестких дисков объемом порядка Петабайта (1 Пб = 10^{15} Б) займет площадь, сравнимую с футбольным полем (см. Рисунок 5.13). С другой стороны, гигантский расход электроэнергии делает нецелесообразным масштабирование дата-центров. По данным агентства по охране окружающей среды при правительстве США [5.152], дата-центры, использующие жесткие диски, потребляют 1.5% валового объема электричества, что составляет в ценовом эквиваленте 4.5 млрд. долл. в год. Время жизни жестких дисков ограничено, что вызывает миграцию данных каждые 2–3 года, в результате которой часть данных может быть утеряна. К сожалению оптические технологии хранения информации (DVD, Blu-Ray диски и т. п.) не могут конкурировать с HDD в силу фундаментальных физических причин, например, слабого взаимодействия света и вещества, и дифракционного предела Аббе, ограничивающего поверхностную плотность записи (менее 100 Гб). Однако



Рисунок 5.13 — Интеграция дата-центров с инфраструктурой облачных сервисов

Источник: [5.152]

бурное развитие нанофотоники в течение последних 15 лет привело к появлению принципиально новых подходов к задаче записи и хранения информации [5.152], которые уже в ближайшем будущем смогут внести существенные изменения в структуру мирового рынка традиционных типов памяти, таких как HDD и SSD. Оптические диски с пета-битовой емкостью позволят в будущем кардинально изменить эффективность и производительность облачных сервисов (см. Рисунок 5.13).

Целью настоящего подраздела является обзор наиболее перспективных оптических технологий записи и хранения информации с точки зрения практической реализуемости и коммерческой масштабируемости. Как и в случае магнитной и электрической памяти целью разработок является увеличение емкости, скорости записи/считывания информации, возможность многократной перезаписи и снижение стоимости единицы хранимой информации. Популярность оптических записывающих устройств (CD, DVD и т. д.), основанных на изменении оптических свойств носителя за счет, например, изменения степени прозрачности или коэффициента отражения; связана с их низкой себестоимостью, удобством транспортировки и возможностью тиражирования. Информационная емкость оптических дисков, разработанных Blu-Ray Disc Association, обладает рекордной (для оптики) информационной емкостью 25 Гб для односторонних и 50 Гб для двусторонних носителей информации. Такая высокая информационная емкость достигается за счет применения

полупроводникового лазера с длиной волны 405 нм, оптической системы с цифровой апертурой 0.8 и светочувствительного слоя толщиной 100 мкм. Тем не менее, развитие оптических технологий хранения данных ограничивается низкой скоростью чтения/записи, ограниченными возможностями перезаписи и наличием считывающей головки.

Ведется активный поиск альтернативных возможностей. К их числу можно отнести, например, молекулярную память, которая основана на технологии атомной туннельной микроскопии, позволяющей добавлять и удалять отдельные атомы в молекулу. Данная технология впервые была представлена в середине 1999 года компанией Nanochip, и теоретически позволяла достичь плотности упаковки около 40 ГБ/см^2, что в десятки раз превосходит существующие серийные образцы жестких дисков. Однако говорить о практической реализации этой технологии преждевременно, по крайней мере в ближайшие 15–20 лет. В последнее время появился ряд технологий таких как спиновая (STT — Spin Transfer Technologies — SST), магниторезистивная, мемристорная память, память на квантовых точках, на углеродных нанотрубках и др. которые развиваются с использованием ресурсов венчурных фондов. И в этих случаях говорить о скором массовом производстве новых устройств хранения данных преждевременно.

Обзор всех предлагаемых сегодня новых решений, концептов и технологий выходит за рамки настоящего раздела, который сфокусирован на следующие оптические методы хранения и чтения/записи информации: фотохромный, голографический, фазовый (память на халькогенидах). Также рассмотрены термоассистируемая магнитная и квантовая память. Важно отметить, что не во всех из перечисленных выше методов память реализуется на физических принципах взаимодействия света и вещества. Однако свет или оптическое ближнее поле часто играют вспомогательную роль в качестве нагревательного элемента с высоким тепловым градиентом, например, в термоассистируемой магнитной и фазовой памяти. Выбор этих методов записи и хранения информации обусловлен значительным научным заделом с одной стороны, и готовностью их к коммерциализации в ближайшие 5–10 лет — с другой (см. Рисунок 5.14). Библиографический анализ демонстрирует в среднем устойчивый

рост во всех вышеперечисленных областях на протяжении последних 15 лет. Взрывная динамика публикаций в области квантовой памяти связана с качественным технологическим скачком как в объеме записываемой информации (на несколько порядков по сравнению с используемыми в настоящее время устройствами хранения информации), так и в скорости ее обработки. Несмотря на очевидную привлекательность квантовой памяти фундаментальные трудности управления квантовыми состояниями не позволяют хотя бы примерно определить временной горизонт их практического использования — даже при наличии работающего концепта. Аналогичная ситуация наблюдается в области развития голографической памяти, для которой уже разработаны работающие архитектуры поверхностной (2D) и объемной (3D) реверсивной записи информации с плотностью до 100 Тб (ближнеполевая 3D голографическая память позволяет хранить до 5 Пб); однако до сих пор эта технология остается в статусе прототипа (на сегодняшний день существует более 50 вариантов [5.157, 5.158]). Это отражается в снижении публикационной активности в этой области (см. Рисунок 5.14). Вероятными сдерживающими факторами являются высокая стоимость хранения единицы объема информации и габариты устройств.

Однако в 2014 году компания Akonia Holographics LLC анонсировала новую технологию голографической записи, которая снимает эти ограничения (см. ниже).

Наиболее востребованной, с точки зрения практического использования, технологией записи и хранения информации является полупроводниковая энергонезависимая память (DRAM, NAND Flash и NOR Flash). Несмотря на ряд технологических преимуществ (см. Таблицу 5.2) масштабирования рынка записывающих устройств этого вида памяти не происходит благодаря высокой стоимости хранения информации. В последнее время активно развивается фазовая резистивная энергонезависимая память на основе халькогенидов $Ge_2Sb_2Te_5$ (GST), которые обратимо переключаются между аморфной фазой с высоким сопротивлением и кристаллической фазой с низким сопротивлением. Такой вид памяти имеет значительно более низкую стоимость хранения единицы информации, легко масштабируется

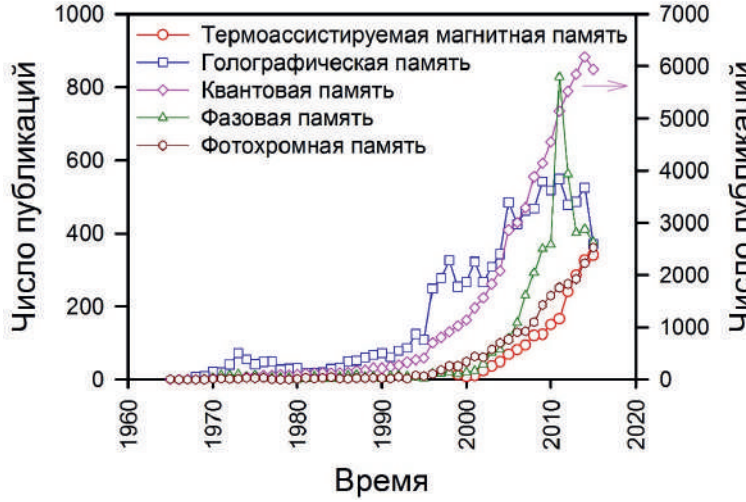


Рисунок 5.14 — Динамика числа публикаций по базе Scopus.

Таблица 5.2 — Сравнительный анализ записывающих сред.

	Магнитная лента	Жесткий диск	Оптический диск BluRay	Флэш память SSD
Стоимость/Тб среды, USD	24	112	450	900
Скорость записи, Мб/с	150	150	20/200	500
Плотность записи, Гб/дм³	177	168	155	246
Время отклика	100 с	10 мс	10 с	10 мкс
Время жизни, лет	20	5–7	50	10

Источник: [5.158]

«сверху-вниз» и демонстрирует лучшие показатели по скорости и емкости записи информации по сравнению с обычными флэш-технологиями. По этим причинам фазовая память на халькогенидах с высокой вероятностью может вытеснить с рынка записывающих устройств активно используемую на практике резистивную флэш-память. Наблюдаемый спад в публикационной активности после 2010 года свидетельствует о «закрытии» темы для публичного доступа и активной коммерциализации этой технологии. Очевидно, этот вид памяти может быть основным драйвером рынка в ближайшие 10–15 лет.

До сих пор остаются привлекательными оптическая память на фотохромах и термоассистируемая магнитная память (HAMR). Новый класс органических красителей, интегрированных в аморфные [5.159] и жидкокристаллические матрицы [5.160], в том числе фотонные кристаллы [5.161], позволяет с помощью оптического ближнего поля записывать информацию на одном хромофоре (размер пита ~1 нм^2) со скоростью ориентации ~10–100 нс. Емкость записываемой информации может быть увеличена до нескольких Пб. Существенными недостатками фотохромной памяти являются низкая надежность и ограниченный срок службы. В настоящее время наблюдается экспоненциальный рост публикаций, связанных с применением азо-хромофоров (см. Рисунок 5.14), тогда как для другого класса фотохромов имеет место стагнация.

В контексте развития средств и методов хранения и обработки цифровых данных ключевой задачей является увеличение поверхностной плотности записи информации, в том числе за пределами обычных методов (например, за дифракционным пределом). Жесткие диски (HDD) доминируют на рынке физических носителей хранения данных (см. Рисунок 5.15), и это направление не теряет своей актуальности благодаря новым возможностям, связанными с термомагнитной записью и битовой структурой записывающей среды [5.156, 5.162].

Термоассистируемая (или термоиндуцируемая) магнитная память является сегодня одной из горячих тем, поскольку основные игроки на рынке записывающих устройств, такие как Seagate, Hitachi и Western Digital, анонсировали

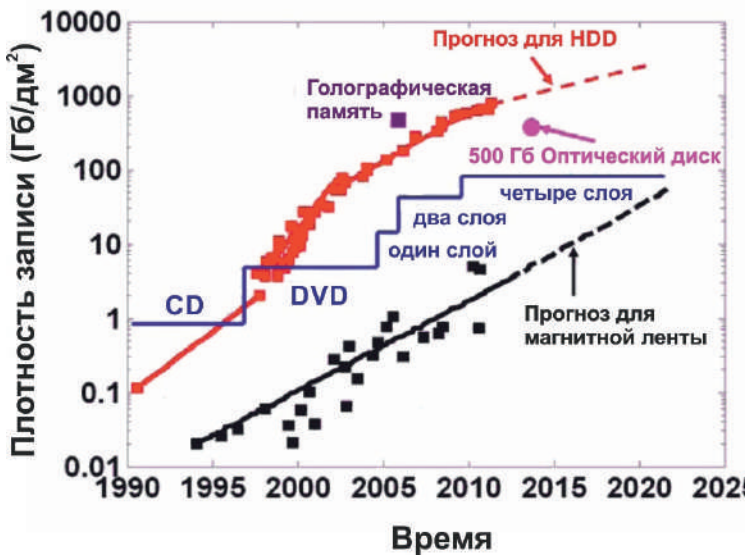


Рисунок 5.15 — Рыночная динамика развития носителей памяти

Источник: [5.152]

релиз жестких дисков HAMR HDD в ближайшие два года. В частности, одним из подразделений Western Digital — компанией HGST начато опытное производство первых жестких дисков объемом 10 ТБ, которые заполнены гелием. Это обеспечивает возможность использования большего количества пластин (в настоящее время до 7) и экономию энергии на 45% на каждый Вт/Тб. Используя технологию вертикальной записи SMR, компании удалось разместить на каждой пластине 1.43 Тб данных [5.163].

Как показано на Рисунке 5.15, в настоящее время уже достигнут предел плотности записи информации на оптических дисках (DVD, Blu-Ray disk), который составляет примерно 1 ГБ/см^2. То же самое справедливо и для магнитной записи, которая еще в 2012 году достигла своего предела — 1 Тб/дм^2. Важно отметить, что записывающие среды, например, для оптических дисков, могут существенно отличаться по своим физико-химическим свойствам (например, азо-красители, квантовые точки в полимерах, халькогениды и т. д.) и по

принципу записи (двухфотонная запись, генерация высших гармоник, голографическая запись и т. д.); поэтому оценить рыночный потенциал и масштаб рынков для каждого конкретного случая не представляется возможным. В этом контексте можно говорить только о совокупном рыночном потенциале оптических дисков, жестких дисков, энергонезависимой твердотельной памяти SSD, динамической памяти случайного доступа (DRAM), мемристорной памяти и т. д.

По данным агентства GlobalSources, ежегодный валовый объем перезаписываемых оптических дисков DVD Blu-Ray оценивается в 30 млрд. долл. Ежегодный прирост объема составляет 57%. На долю голографических дисков приходится всего 4%.

Важно отметить, что несмотря на более низкую (по сравнению с жестким диском) емкость магнитных лент их практическое использование (в основном для резервного копирования) по-прежнему не уменьшается. Ежегодный линейный рост объема рынка составляет 31.8% (см. Рисунок 5.15). Обратная ситуация наблюдается для традиционных оптических дисков, перспектива развития которых выглядит сомнительной по причине медленного роста их емкости и высокой стоимости хранения информации. Возможный прорыв можно ожидать в направлении создания оптического диска емкостью до 500 Гб (см. Рисунок 5.15). Этого можно достичь с помощью увеличения число записывающих слоев. Компания TDK (Япония) уже анонсировала Blu-Ray диски с 4 слоями, которые обеспечивают емкость 100 Гб. Широко известными зарубежными компаниями по производству компакт-дисков являются Moser Baer, Ritek, CMC и др. В России осуществляется только тиражирование CD, DVD, HD-DVD дисков под брендами (Mirex, A-Media, SKAZY и Трилайн) на импортном оборудовании (MCL-500, STEAG-3503 и т. д.). Российским лидером по производству компакт-дисков является компания Laser Craft. К сожалению, на сегодняшний день в Российской Федерации не существует инновационных компаний по разработке оптических носителей хранения информации. Одной из главных причин является недостаточное финансирование на всех этапах создания инновационного продукта — от НИОКР до первых продаж и масштабирования производства. Например, американская компания Akonia Holographics LLC

для создания новой голографической платформы, основанной на мультиплексировании с помощью динамической апертуры [5.157, 5.158], инвестировала в НИОКР 100 млн. долл. на протяжении 10 лет. Это одна из передовых технологий сверхплотной оптической записи данных, достигающей емкости ~2 Тб/дм^2 и скорости записи 300 Мб/с.

В настоящее время нет сомнения в скорой модернизации оптических дисков голографическими и ближнеполевыми битовыми технологиями. Как и в случае с магнитными лентами, оптические диски будут еще долго востребованы, по меньшей мере, для резервного копирования [5.153]. Продолжается поиск новых физических принципов и механизмов многомерного хранения данных с емкостью и скоростью доступа к информации на 2–3 порядка превышающими возможности современных технологий.

5.3.2. Оптическая память на фотохромах

Проблемы, решаемые благодаря развитию науки и технологий в анализируемой области

Фотохромная память основана на использовании флуоресцирующих красителей или хромофоров, спектры поглощения которых могут существенно меняться при изменении их электронной конфигурации. Эти изменения могут происходить, например, в ходе фотохимических реакций, фотоизомеризации, фотодиссоциации, фотоионизации или фотозамещения. Фотохромизм органических и неорганических соединений основан на обратимых фотохимических реакциях и фотофизических процессах T-T поглощения и S-S просветления.

Перспективы повышения информационной емкости оптических дисков обычно связывают с созданием многослойных светочувствительных покрытий для побитовой регистрации информации и толстых (больше 2 мм) светочувствительных слоев для голографической регистрации информации. Такие информационные носители обеспечивают реализацию трехмерной оптической памяти с плотностью записи более 1 Тб за счет двухфотонной записи и воспроизведения информации в различных слоях регистрирующей среды

в случае побитовой оптической памяти или под различными углами падения активирующего и восстанавливающего лазерного излучения в случае голографической оптической памяти [5.164–5.166]. Разработка таких перезаписываемых (реверсивных) дисков базируется на использовании светочувствительных органических сред, испытывающих фотохимические превращения. Такие среды по сравнению с используемыми в настоящее время термочувствительными материалами обладают более высокой разрешающей способностью.

Разработка двухфотонных фотохромных регистрирующих сред активно ведется для создания реверсивных оптических дисков, обеспечивающих побитовую запись, перезапись и считывание оптической информации в каждом слое многослойной регистрирующей среды [5.167, 5.168]. Такие среды разрабатываются, в основном, в США (фирма Call/Recall Corporation, Irvine and San Diego Universities of California) и Японии (Japan Science and Technology Corporation, Kyushu, Osaka, and Shizuoka Universities). В этих разработках используются полимерные растворы термически необратимых фотохромных соединений различных классов: диарилэтенов, фульгидов, фульгимидов, феноксипроизводных феноксинафтаценхинов и др. [5.169, 5.170]. Анализ полученных результатов показывает, что наибольшее внимание уделяется разработке фотохромных полимерных регистрирующих сред для 3D оптической памяти на основе термически необратимых диарилэтенов из класса гексафторциклопентеновых производных диарилэтена. Серьезным недостатком этого класса соединений являются высокая стоимость и трудоемкость их синтеза. Поэтому поиск доступных и дешевых соединений из класса производных диарилэтенов представляет важную задачу при создании фотохромных полимерных материалов и многослойных регистрирующих сред.

Основные направления исследований и их применений

В существующих устройствах памяти запись информации производится на поверхности активной среды. В качестве таковой используются бистабильные фотохромные соеди-

нения и запись производится при помощи метода двухфотонной спектроскопии, когда энергия, необходимая для реализации фотохимической перегруппировки доставляется в определенную точку объемного материала двумя квантами, суммарная энергия которых соответствует энергии возбуждения. Считывание записанной информации осуществляют посредством регистрации флуоресценции, которой должен обладать один из изомеров фотохромной системы [5.171].

Устройства трехмерной оптической памяти могут обеспечить колоссальную плотность информации. Даже при использовании лазера с излучением 532 нм плотность записанной информации составляет около 10 ТБ/см^3, а при использовании УФ-лазеров эта величина может быть повышена еще на порядок.

К материалам для устройств трехмерной оптической памяти предъявляются очень жесткие требования: отсутствие фотодеградации, высокие сечения двухфотонного поглощения, высокие выходы флуоресценции.

Барьеры развития — научные и технологические

Фотохромные полимеры крайне чувствительны к поляризации падающего света, которая вызывает изменение ориентации молекул в пространстве. Данный вид материалов пробуют применять в известных технологиях записи, таких как HD-DVD диски (использования полимерных записывающих слоев могло бы позволить создать DVD-диск с многократной записью). Фотохромизм органических и неорганических систем основан на обратимых фотохимических реакциях. Фотохромные среды на данный момент не могут применяться в технологиях долгосрочной оптической памяти в силу низкой термостабильности и проблем неразрушающего считывания записанной информации.

Решение этих проблем связано с синтезом новых соединений, в том числе структурных модификаций известных фотохромных веществ. Изготовление фотохромных записывающих сред с термической стабильностью возможно с использованием фульгидов и фульгимидов [5.173], арилоксихинонов [5.174], диарил-этенов с гетероциклическими кольцами [5.175] и производных антрацена [5.176]. Среди

них фотохромные системы на основе производных феноксинафтацен-хинона демонстрируют лучшую устойчивость по отношению к необратимым фотоиндуцированным превращениям, в ходе которых при взаимодействии со светом анаструктуры преобразуются в хитонные структуры.

Оценки текущего и потенциального спроса (масштабы рынков)

Как показано на Рисунке 5.15, в настоящее время уже достигнут предел плотности з,аписи информации на оптических носителях (DVD, Blu-Ray disk), который составляет ~1 ГБ/см^2. Важно отметить, что записывающая среда, например, для оптического диска, может существенно отличаться по своим физико-химическим свойствам (например, азо-красители, квантовые точки в полимерах, халькогениды и т. д.) и по принципу записи (двухфотонная запись, генерация высших гармоник, голографическая запись и т. д.); поэтому оценить рыночный потенциал и масштаб рынков для каждого конкретного случая не предоставляется возможным. В этом контексте можно говорить только о совокупном рыночном потенциале оптических дисков, жестких дисков, энергонезависимой твердотельной памяти SSD, динамической памяти случайного доступа (DRAM), мемристорной памяти и т. д. По данным агентства GlobalSources, ежегодный валовый объем производства реверсивных оптических дисков DVD Blu-Ray оценивается в 30 млрд. долл. Ежегодный прирост объема составляет 57%. На долю голографических дисков приходится всего 4%.

Обратная ситуация наблюдается для традиционных оптических дисков, перспектива развития которых выглядит сомнительной по причине медленного роста их емкости и высокой стоимости хранения информации. Возможный «прорыв» можно ожидать в направлении создания оптического диска емкостью до 500 Гб (см. Рисунок 5.15). Это возможно при увеличении количества записывающих слоев. Компания TDK (Япония) уже анонсировала релиз Blu-Ray дисков с 4 слоями, которые обеспечивают емкость диска 100 Гб. Широко известными зарубежными компаниями по производству компакт-дисков являются Moser Baer, Ritek, CMC и др. В России

осуществляется только тиражирование CD, DVD, HD-DVD дисков под брендами (Mirex, A-Media, SKAZY и Трилайн) на импортном оборудовании (MCL-500, STEAG-3503 и т. д.). Российским лидером по производству компакт-дисков является компания Laser Craft. К сожалению, на сегодняшний день в Российской Федерации не существует инновационных компаний по разработке оптических носителей хранения информации. Одной из главных причин является недостаточное финансирование на всех этапах создания инновационного продукта — от НИОКР до первых продаж и масштабирования производства. Например, американская компания Akonia Holographics LLC для создания новой голографической платформы, основанной на мультиплексировании с помощью динамической апертуры [5.177, 5.178], инвестировала в НИОКР 100 млн. долл. на протяжении 10 лет. Это одна из передовых технологий сверхплотной оптической записи данных (емкость до 2 Тб/дм^2, скорость записи 300 Мб/с).

На каком временно́м горизонте можно ожидать коммерциализации новых технологий

В настоящее время нет сомнения в скорой модернизации оптических дисков голографическими и ближнеполевыми битовыми технологиями. Как и в случае с магнитными лентами, оптические диски будут еще долго востребованы, по меньшей мере, для резервного копирования [5.153]. Продолжается поиск новых физических принципов и механизмов многомерного хранения данных с емкостью и скоростью доступа к информации на 2–3 порядка превышающих возможности современных технологий. По разным оценкам, внедрение этих технологий произойдет в ближайшие 1–2 года.

5.3.3. Термоассистируемая магнитная память

Проблемы, решаемые благодаря развитию науки и технологий в анализируемой области

Технология термоассистируемой (или термоиндуцированной) магнитной записи (heat-assisted magnetic recording — HAMR) является эволюционным преемником технологии перпендикулярной магнитной записи, используемой при создании жестких дисков. Эта технология позволяет снять ограничение супермагнитного предела, возникающее из-за уменьшения размеров магнитных доменов, необходимого для увеличения плотности записи данных. Локальный нагрев приводит к уменьшению коэрцитивности магнитного материала и, таким образом, становится возможным использовать значительно меньшие значения магнитного поля для записи информации. Пионером в этой области является американская компания Seagate Technology, которая ведет разработки с 1998 года. Аналогичные работы по созданию жестких дисков с гибридной технологией, интегрирующей магнитооптическую запись и магнитное чтение, проводят Fujitsu и Hitachi. Несмотря на многократные заявления Seagate Technology о релизе HAMR HDD, диски нового поколения до сих пор не появились. Основные трудности связаны с разработкой записывающей головки со встроенным ближнеполевым трансдьюсером (near-field transducer — NFT) для оптического нагрева за дифракционным пределом и с созданием помехоустойчивой и сильно анизотропной записывающей среды с гранулированной структурой (мельче 5 нм) на основе FePt [5.177]. На сегодняшний день достижимый предел для термомагнитной записи составляет 5.8 Тб/дм^2. Это значит, что 3.5-дюймовые жесткие диски смогут иметь емкость от 50 до 70 Тб [5.178–5.180]. Одного такого диска будет достаточно, чтобы записать на него в неархированном виде все материалы библиотеки Конгресса США [5.181].

Основные направления исследований и их применений

Важно отметить, что наряду с инновационной термоассистируемой магнитной памятью, активно исследуются альтернативные подходы, такие как: черепичная (Shingled Magnetic Recording, SMR) и побитовая магнитная запись (Bit-Patterned Magnetic Recording BPMR). В первом случае запись осуществляется последовательно с перекрытием магнитных дорожек, которые напоминают черепицу. SMR запись на пересекающихся дорожках сильно напоминает архитектуру SSD NAND памяти и, по всей вероятности, будет использована в основном при создании хранилищ большого объема с последовательным доступом [5.178]. Во втором типе памяти создаются изолированные магнитные домены, которые не интерферируют друг с другом при записи/чтении данных.

К сожалению, возможности литографического оборудования сегодня не позволяют BPMR достичь плотности записи, типичной для непрерывных носителей с наногранулированной структурой. С появлением оптических литографов (временной горизонт — 5–7 лет), обеспечивающих топологический масштаб 5–8 нм, побитовая BPMR запись будет иметь конкурентное преимущество перед непрерывными магнитотвердыми носителями. Перспективной выглядит комбинация этих двух технологий [5.178]. Показана возможность достижения плотности записи до 10 Тб/дм^2.

Важно отметить, что HAMR технология обеспечивает доступ не только к широкому классу магнитотвердых материалов с высокой анизотропией, способных к перемагничиванию термически стабильных магнитных моментов малых размеров (размер дорожки меньше 50 нм), но и открывает путь к большим градиентам магнитного поля для более плотной записи и преодоления супермагнитного предела.

Одной из важных задач является выбор материала для активного записывающего слоя, который был бы локально устойчив к высоким температурам. С одной стороны, поверхностный защищающий слой, над которым движется непосредственно магнитная головка, при нагревании должен сохранять термическую стабильность, с другой — необходимо избегать химического упорядочивания и образования,

с повышением температуры, более крупных кристаллических доменов. Высокую магнитную анизотропию демонстрирует класс материалов $SmCo_5$ и $Fe_{14}Nd_2B$. Однако состояние необходимое для магнитной записи сложно получить с помощью технологии магнетронного распыления. С другой стороны, из-за наличия редкоземельных элементов, эти материалы имеют высокий потенциал к коррозии.

Среди наиболее перспективных претендентов на роль записывающего магнитного слоя выступают сплавы CoPtX, CoPt(Pd)X, FePt(X), MnAl и редкоземельные металлы переходной группы [5.182, 5.162, 5.180]. Все эти сплавы нашли широкое применение в перпендикулярной магнитной записи. На сегодняшний день наиболее перспективным материалом для HAMR технологии является FePt, который обладает не только высокой магнитной анизотропией, но и подходящей наногранулированной структурой (около 5 нм), позволяющей избежать интерференционных помех при чтении/записи.

Важным параметром в HAMR технологии является температура Кюри. Для многих магнитных материалов температура Кюри изменяется в диапазоне от 750 до 1000 К. Такой температурный диапазон сильно ограничивает применение золотых нанородов для локального нагрева с помощью субволнового сжатия света. Управлять температурой Кюри магнитных сплавов можно путем их допирования атомами никеля. В частности, для FePt сплавов с 30% содержанием Ni удалось уменьшить температуру Кюри до 400 К. Однако, с понижением температуры ухудшается анизотропия магнитной записывающей среды. Аналогичным образом можно уменьшить влияние химического упорядочивания в магнитных сплавах путем добавления Ag или Cu [5.162].

Барьеры развития — научные и технологические

В 2014 году всеми производителями было выпущено 560 млн. жестких дисков общей емкостью 1 Зб [5.152]. Тем не менее, спрос на хранение данных значительно превосходит текущее рыночное предложение производителей HDD и SSD, несмотря на то, что плотность записи данных в жестких дисках увеличивалась в среднем на 40% в год, опережая темпы роста плотности размещения транзисторов на интегральных чи-

пах [5.156]. В 2012 году технология перпендикулярной магнитной записи достигла предела своих возможностей. Это связано с достижением фундаментального (супермагнитного) предела — для увеличения плотности записи необходимо уменьшать размер магнитного домена на жестком диске. Вместе с этим увеличивается коэрцитивность магнитного материала, которая приводит к необходимости прикладывать достаточно сильные магнитные поля, чтобы эффективно ориентировать магнитные моменты на диске и, соответственно, кодировать информацию. Однако требуемые поля значительно превышают магнитное насыщение используемых для записывающих головок CoFe электромагнитов.

При коммерческой реализации HAMR также важно решение сугубо прикладных задач, таких как дизайн записывающих головок, поиск дешевых в производстве материалов с высокой магнитной анизотропией и создание архитектуры жесткого диска. Одна из первых задач — это доставка света непосредственно к записывающей головке. Поскольку последнюю необходимо сделать максимально мобильной, было предложено несколько методов. Наиболее простой подход заключается в размещении лазера непосредственно на записывающей головке. Для реализации этого метода были разработаны маленькие лазерные диафрагмы [5.183, 5.184], основным преимуществом которых является отражение света обратно в резонатор, в котором возникает дополнительное вынужденное излучение. Другими способами для транспорта света являются использование оптических наноантенн и оптических волокон [5.185]. Наконец, лазерный луч может быть соединен с записывающей головкой в плоском волноводе с помощью дифракционной решетки [5.186].

Оценки текущего и потенциального спроса (масштабы рынков)

По данным агентства Softpedia, компания Seagate планирует разработать прототип HAMR HDD с емкостью 10 Тб к концу 2016 года [5.187]. После тестирования в течение двух лет, компания анонсирует первые продажи жестких дисков в 2018 году. Однако первые продукты будут внедряться только в облачные сервисы и дата-центры и, в случае успеха,

появятся в розничном сегменте. К 2025 году усилия консорциума производителей жестких дисков HDD ASTC будут направлены на достижение плотности записи более 100 Тб. Главными конкурентами компании Seagate выступают Samsung, Toshiba и Sandisk, усилия которых направлены на создание к концу 2018 года флэш-памяти нового поколения (3D BiCS NAND) с емкостью до 128 Тб. Существенными недостатками флэш-памяти является высокая стоимость хранения на 1 Гб информации и низкие показатели числа циклов перезаписи. Несмотря на это, прогнозируемая динамика роста емкости для SSD памяти значительно превосходит таковую для HDD дисков с учетом HAMR технологии.

На каком временно́м горизонте можно ожидать коммерциализации новых технологий

Несмотря на бурное развитие альтернативных средств сверхплотной записи информации, рыночный сегмент HDD дисков будет сохраняться на протяжении еще 15–20 лет.

5.3.4. Память на фазовых переходах (халькогениды)

Проблемы, решаемые благодаря развитию науки и технологий в анализируемой области

Наряду с технологиями, представленными выше, энергонезависимая полупроводниковая фазовая память (Phase Change Memory — PCM) представляет наиболее перспективную технологию для дальнейшего развития, коммерциализации и масштабирования. Популярная в настоящее время твердотельная зарядовая память (DRAM, NAND Flash или NOR Flash) имеет фундаментальные ограничения, связанные с неустойчивостью хранения электрического заряда при уменьшении ячейки. Другим словами, такая память не масштабируется. Безусловно возникает потребность в развитии новой беззарядовой платформы хранения данных и формирования на ее основе нового целевого рынка резистивной памяти [5.188]. Данный вид памяти составляет серьезную конкуренцию зарядовой памяти случайного доступа (DRAM) и флэш-памяти

благодаря масштабируемости «вниз», низкой себестоимости и высокой производительности. В настоящее время реализована технология фазовой памяти на масштабе 58 нм [5.189]. Физических ограничений для достижения минимального размера записывающего бита — 2–5 нм не существует. Кроме того, фазовая технология позволяет реализовать многобитовый режим записи данных благодаря широкому диапазону сопротивлений, реализующемуся в процессе фазового перехода халькогенидного сплава из аморфного в кристаллическое состояние. Также, до сих пор ведутся активные исследования по уменьшению программируемых токов и расходуемой энергии.

Основные направления исследований и их применений

Запись и считывание информации в PCM основана на изменении электрического сопротивления некоторого малого объема вещества. Активный материал элемента памяти PCM, находящийся в аморфной фазе, имеет высокое сопротивление. А в поликристаллической фазе — низкое. Изменение фазового состояния материала вызывается локальным нагревом, возникающем при прохождении тока через резистивный нагревающий элемент, контактирующий со слоем халькогенидного материала. Первыми материалами для фазовой памяти были стекла на основе теллура Te и эвтектические сплавы теллура и германия (Te и Ge), легированные сурьмой Sb, серой S и фосфором P [5.190]. В этих материалах наблюдается изменение фазы вещества при нагревании, и они могли бы быть использованы для электронного хранения данных, но время кристаллизации этих материалов составляет величину порядка микросекунд.

В 1990 году компании Energy Conversion Devices Inc. и Ovonyx Inc. разработали новый тип реверсивной полупроводниковой памяти, основанной на быстрых фазовых переходах в халькогенидных стеклах (с характерным временем срабатывания порядка 20 нс), в частности, в сплаве $Ge_2Sb_2Te_5$, который используется в коммерческой ячейке памяти OUM (Ovonic Unified Memory) [5.191].

Уникальность халькогенидного сплава определяется электронными свойствами аморфного и кристаллического состояний, электрическое сопротивление которых отличается на три порядка: 25 Ом/см для аморфного и до 20 МОм/см для кристаллического.

В перезаписываемых CD и DVD дисках для нагревания халькогенида и переключения между двумя состояниями используется лазерное излучение [5.192]. Записанное состояние воспроизводится с помощью лазерного излучения меньшей интенсивности (измеряется коэффициент отражения между двумя фазами).

Первыми материалами с быстрой кристаллизацией и хорошим оптическим контрастом были GeTe и $Ge_{11}Te_{60}Sn_4Au_{25}$ [5.193–5.197]. В настоящее время халькогениды делятся на три класса: эвтектические сплавы, содержащие Te, псевдо-бинарные сплавы GeTe-Sb_2Te_3 и эвтектические сплавы, содержащие Sb. Первый класс соединений, включающий $Ge_{15}Te_{85,}$ показывает сильно устойчивое аморфное состояние при комнатной температуре за счет большой скорости рекристаллизации, тогда как псевдо-бинарное семейство GeTe-Sb_2Te_3 обеспечивает быструю рекристаллизацию и сильный оптический контраст. Важным физическим свойством халькогенидов является аномально большая разница в электрическом сопротивлении между аморфным и кристаллическим состояниями,— как правило, она составляет три порядка. Именно этот класс, включающий $Ge_2Sb_2Te_5$ (GST225), GeSbTeN, GeSnSbTe, GeBiSbTe, GeBiTe и GeInSbTe, приобрел широкую популярность при создании фазовой энергонезависимой полупроводниковой памяти. Среди этих композитов GST225 представляет собой «золотой стандарт» для фазовой записи данных. Эвтектические сплавы на основе Sb — такие, как $In_x(Sb_{70}Te_{30})_{1-x}$ и $Ag_x\ In_y(Sb_{70}Te_{30})_{1-x-y}$, используются как быстро переключаемые записывающие среды, в которых кристаллизация начинается на границах между аморфной затравкой и кристаллической матрицей. В отличие от допированного SbTe, в котором мала вероятность образования зародышей другой фазы, кристаллизация халькогенидного сплава начинается с малых неустойчивых кластеров внутри аморфной фазы, которые быстро достигают критических размеров.

Одной из важных задач является интегрирование полупроводниковой памяти в КМОП-транзисторы и металлические контакты без их разрушения. Работы в этом направлении ведутся почти 15 лет рядом компаний, такими как Ovonyx Inc., BAE SYSTEMS Inc., Space Vehicles Directorate of the Air Force Research Laboratory (AFRL) и другими.

Барьеры развития — научные и технологические

PCM обладает уникальным набором свойств, однако существует ряд проблем при ее использовании. Одной из них, как было отмечено выше, является высокая плотность программируемого тока — более 10^7 А/см^2. С другой стороны, нагреваемый элемент памяти должен быть бóльшого размера, поэтому стоимость технологического процесса может быть выше, чем у флэш-памяти. При уменьшении характерных размеров элемента до 5–20 нм, возникает проблема изменения состава халькогенидного материала из-за электромиграции. Последняя приводит к образованию пустот в активном материале, которые ухудшают контакт с электродом и увеличивают вероятность потери данных. Перекрестные помехи при действии тепла вызывают мягкий сброс и влияют на срок хранения данных при повышенной температуре. Халькогенидный материал в расплавленном состоянии вступает в реакцию с материалом подложки и электродом. Это приводит к утечке заряда и отрыву активного материала от электрода. Октаэдрическое расположение атомов в кристаллической решетке вызывает локальные искажения при перезаписи. Важной особенностью таких сплавов является высокая внутренняя концентрация вакантных мест, которые неизбежно повышают энергию кристаллизации. Так, например, удаление атомов Ge или Sb из кристалла GST 225 повышает количество вакантных мест, а возникающие искажения приводят к сильному уменьшению энергии и стабилизации сплавов [5.198].

Одним из важных параметров любого типа памяти является ее надежность и долговечность. Количественной характеристикой является число циклов перезаписи до появления первой ошибки. По сравнению с популярной флэш-технологией с числом перезаписей порядка 10^6, для фазовой памяти

на халькогенидах это значение достигает 10^{10}–10^{13}. Среди прочих, преимуществом технологии беззарядовой энергонезависимой фазовой памяти является масштабируемость. В этом смысле успех внедрения этого типа памяти во многом зависит от возможностей современного литографического оборудования. Кроме того, для создания ячейки памяти не требуется интеграции с кремниевой подложкой, что обеспечивает возможность формирования многослойной тонкопленочной архитектуры, например, на металлических пленках.

Оценки текущего и потенциального спроса (масштабы рынков)

На практике фазовая память на халькогенидах используется как в оптических DVD дисках, так и в энергонезависимой электронной памяти случайного доступа. Как видно на Рисунке 5.14, после 2010 года наблюдается резкое падение публикационной активности в области энергонезависимой резистивной фазовой памяти. Это свидетельствует о массовом выходе ряда коммерческих устройств хранения информации, построенных на этих принципах. В декабре 2006 г. в лаборатории IBM был изготовлен прототип PCM-ячейки с размером активной области 3Ч20 нм. В феврале 2008 года, после 8 лет разработок (инвестиции в которые составили 2.5 млрд. долл.), корпорация Intel совместно с компанией ST Microelectronics впервые объявили о начале серийного производства элементов фазовой памяти. Представленное устройство было выполнено по 90-нм технологии и имело объем 128 Мб. В 2010 г. стартап Numonyx начала выпуск элементов памяти объемом 1 Гб. В 2011 г. Samsung начала производство смартфонов с использованием фазовой памяти, это позволило значительно снизить энергопотребление и увеличить время работы устройства. Как было отмечено выше, большую роль в развитии первых прототипов фазовой памяти сыграл инновационный стартап Ovonyx Inc. Ведущими компаниями являются Micron Technology, Samsung, Intel, Western Digital, Hitachi и SK Hynix. По данным агентства Stratistics MRC, глобальный рынок фазовой памяти достиг 687 млн. долл. в 2015 году. По прогнозам Stratistics MRC и Yole Developpement рынок вырастет до 2.3 млрд. долл. к 2022 году.

На каком временно́м горизонте можно ожидать коммерциализации новых технологий

Быстродействующая и энергонезависимая фазовая резистивная память на основе халькогенидов имеет значительно более низкую стоимость хранения единицы информации, легко масштабируется,— в перспективе до 2–5 нм, и демонстрирует лучшие показатели по скорости и емкости по сравнению обычными флэш-технологиями. С другой стороны, этот вид памяти является перспективным для военной и аэрокосмической областей, где радиация делает бессмысленным использование стандартной энергонезависимой памяти. В частности, военная корпорация BAE Systems заявила о достижении порядка 10^8 циклов перезаписи, что делает эту разработку претендентом на замену PROM- и EEPROM-чипов в космических системах. По этим причинам PCM-ячейка и ее аналоги с высокой вероятностью могут вытеснить с рынка записывающих устройств уже активно используемую на практике зарядовую энергонезависимую флэш-память. Эта технология может быть основным драйвером рынка в ближайшие 2–4 года.

5.3.5. Голографическая память

Проблемы, решаемые благодаря развитию науки и технологий в анализируемой области

Принципы голографической памяти начали активно развиваться с момента создания когерентных источников света — лазеров. В конце 60-х годов были созданы первые объемные пропускающие, отражательные и мультиплексные голограммы [5.199]. Это привело к всплеску публикационной активности в начале 70-х в области создания 3D голографической памяти (см. Рисунок 5.14). К середине 70-х годов 20 века интерес к голографическим системам памяти практически угас, так как не существовало малогабаритных устройств ввода постраничной информации достаточно большого объема, а также доступных устройств считывания этой информации при восстановлении голограмм. В начале 90-х годов, с развитием микроэлектроники, особенно в области создания

малогабаритных жидкокристаллических матриц и матриц фотодетекторов на основе ПЗС или КМОП-технологий, ситуация кардинально изменилась. В частности, группа проф. L. Hesselink (Stanford, USA) впервые разработала технологию многостраничной голографической записи. Фундаментальный вклад в развитие голографической памяти сделали проф. D. Psaltis и проф. F. Mok (Caltech, USA). В 1994 году DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency, США) запустила две государственные программы PRISM (PhotoReactive Information Storage Materials) и HDSS (Holographic Data Storage Systems), которые объединили много компаний и университетов по всему миру. В частности, компания IBM разработала две системы — PRISM, которая измеряет скорость битовых ошибок в разных материалах и оптических конфигурациях; и DEMON — голографическую записывающую платформу, которая тестирует алгоритмы кодирования. В этот же период компания Lucent Technology Inc. разработала новый материал для объемной голографической памяти на основе фотореактивного полимера [5.166].

Усилия многих исследователей в ведущих университетах и компаниях мира привели к пониманию общих принципов построения голографических систем памяти. Были сформулированы основные требования к компонентам таких систем с учетом всех ограничений, которые присущи данному методу. Первые голографические диски формата HVD (Holographic Versatile Disk) были разработаны компанией Maxell Inc. Они позволяют записывать до 3.9 Тб информации на светочувствительном полимерном слое. Для считывания информации с голографического HVD диска используются два лазера с разными длинами волн, зеленый — для считывания данных и красный — для контроля и управления сервоприводом диска. Скорость считывания информации достигает 125 Мб/с. Существуют и альтернативные голографические системы записи и хранения информации. Компания InPhase Inc. (США) разработала голографические диски Tapestry емкостью 300 Гб и скоростью считывания 20 Мб/с, которые несколько больше по размеру, чем диски DVD (диаметр 130 мм, толщина 3.5 мм). В ближайшем будущем компания планирует увеличить емкость до 1.6 Тб. Данные записываются в двоичном коде и отображаются на жидкокристаллическом (ЖК)

модуляторе света, который просвечивается лазерным лучом с длиной волны 405 нм. Прошедший через ЖК модулятор лазерный луч далее фокусируется на голографический регистрирующий материал. В эту же точку фокусируется излучение опорной волны того же лазера. Таким образом, происходит запись голограммы. Для повторной записи на это же место за счет наклона зеркала изменяется угол падения опорного пучка. Производители рассчитывают на высокую стабильность хранения данных (более 50 лет) при многократном считывании.

Однако в настоящее время интерес к голографической памяти в научных кругах снова заметно снизился (см. Рисунок 5.14). Это объясняется тем, что несмотря на большие ожидания, до сих пор не удалось создать ее коммерческий прототип [5.200].

Основными трудностями на пути решения этой проблемы являются создание фоточувствительных материалов для записи и сложность и дороговизна используемой оптической системы. Использование светочувствительных материалов для многократной записи приводит со временем к потере их функциональности — голограммы бледнеют, появляются шумы, что отражается на целостности записанных данных. Даже при однократной записи имеет место усадка или деформация прореагировавших со светом областей, что приводит к изменению или потере данных при их воспроизведении. Вторая проблема связана с лазерным источником, в качестве которого необходимо использовать мощный лазер с низкой расходимостью. Поэтому компактные полупроводниковые лазеры не подходят для таких систем.

Основные направления исследований и их применений

Плотность оптической записи информации ограничена дифракционным пределом Аббе, поэтому не может превышать ~5 ГБ/дм^2. Разработанные в последнее время гибридные голографические системы позволили преодолеть этот барьер и возродили интерес к технологии [5.157, 5.158, 6.201–6.203]. В частности, стало возможным достичь рекордных для оптики значений плотности и скорости записи (до 8 Тб/дм^2

и 200 Мб/с). Продолжается поиск новых возможностей увеличения информационной плотности записи и скорости выборки информации с помощью голографического метода — как наиболее перспективного кандидата на создание высокоэффективной системы записи и хранения информации.

Голографический принцип записи состоит в регистрации одновременно объектной (несущей информацию об объекте) и опорной (эталонной) волн. В результате сложения взаимно когерентных опорной и объектной волн происходит преобразование фазовых соотношений в амплитудную структуру интерференционной картины. Регистрация этой интерференционной картины на голографическом оптическом диске и приводит к записи голограммы. Изменения в материале голографического диска могут быть в виде модуляций поглощения, показателя преломления или толщины. Прогресс в разработке голографических систем хранения информации связан в основном с развитием современных технологий, позволяющих производить относительно дешевые устройства ввода/вывода информации, а также успехами в разработке новых регистрирующих сред для голографической записи. Важной особенностью голографического метода является то, что при записи большого числа объектных волн (каждая из которых представляет один бит информации) они распределяются по всей площади голограммы. Таким образом, повреждение или утрата части голограммы будет приводить лишь к уменьшению уровня сигнала при ее считывании, не нарушая при этом целостности картины восстановленных объектных волн. По этой причине, распределенная голографическая запись является принципиально гораздо более устойчивой к появлению каких-либо ошибок или сбоев в канале считывания (см. Рисунок 5.16).

Преимущества голографической памяти по сравнению с другими (в том числе и оптическими) методами записи/считывания заключаются:

- в высокой плотности записи (теоретически до 8 Тб/дм^2), высокой скорости записи/считывания (до 200 Мб/с);
- высокой помехозащищенностью записи;
- возможности реализации алгоритмов поиска данных с использованием свойства ассоциативности голографического метода записи;

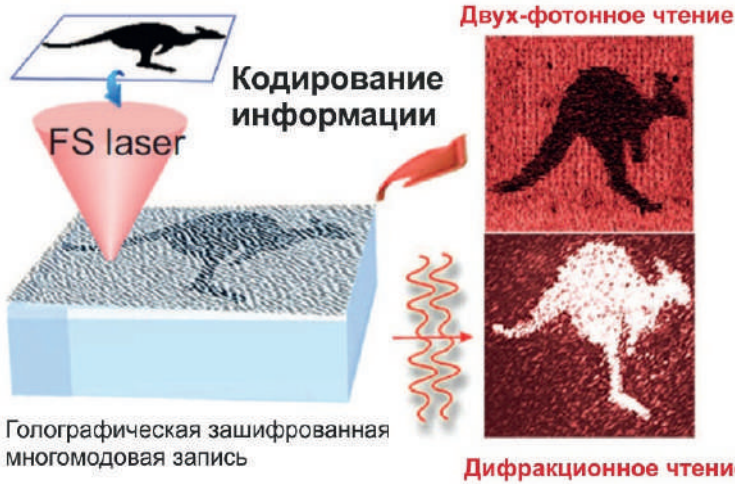


Рисунок 5.16 — Голографическая запись в многомодовом режиме с помощью фемтосекундного лазера и чтение информации методами двухфотонной флуоресценции и дифракционного рассеяния

- возможности проведения различных логических и математических действий, в частности, выполнения параллельных ассоциативных операций — таких, как: поиск данных, детектирование изменений, коррелирование и распознавание образов.

Наконец, запись/чтение данных может выполняться в режиме реального времени.

Каждая из голограмм одновременно хранит все записанные в ней данные. Это позволяет существенно увеличить скорость не только записи, но и чтения данных с оптического голографического диска. Поэтому голографические системы памяти могут быть легко интегрированы для взаимодействия с оптическими компьютерами, в которых реализуется принцип параллельности обработки информации. Параллельный доступ ко всей информации, хранящейся в голографическом запоминающем устройстве, делает возможным извлечение полезной информации за время одного периода обращения, то есть существенно уменьшить время считывания. В настоящее время скорость оптического считывания

информации в голографических системах памяти достигает 10 ГБ/с, а с учетом перевода информации в электронный вид — около 1 ГБ/с.

Для дальнейшего увеличения плотности записи используется принцип мультиплексирования, основанный на записи информации в один и тот же объем. Традиционно для достижения этой цели используют изменение угла падения опорного пучка и изменение его длины волны. В последнее время активно развиваются альтернативные подходы такие как: сдвиговое мультиплексирование и политопное мультиплексирование [5.203]. Методы мультиплексирования обычно применяются в сложных оптических системах с использованием толстых (порядка 1 мм) светочувствительных записывающих сред. Часто различные механизмы мультиплексирования комбинируются. Одним из самых эффективных способов увеличения плотности записи данных является голографическое мультиплексирование с динамической апертурой [5.158], которое представляет собой гибридную технологию, включающую сдвиговое и политопное мультиплексирование.

Внеосевая однолучевая конфигурация с угловым мультиплексированием (диапазон углов около 25°) позволяет записать до 192 голограмм в одном объеме с помощью гальванозеркала [5.158]. Общая емкость диска диаметром 120 мм составляет 700 Гб. В работе [5.203] была разработана однолучевая схема на основе углового мультиплексирования, совместимая с Blu-Ray Disk, обеспечивая плотности записи 500 ГБ/дм^2. Динамическая апертура позволяет расширить диапазон углов до 100° и увеличить число записываемых голограмм до 1178 с плотностью записи выше 2 Тб/дм^2. В разработку этой технологии Akonia Holographics LLC инвестировала более $100M [5.157, 5.158]. Создаваемая компанией новая платформа голографической записи позволит в ближайшее время добиться емкости до 16 Тб/дм^2, скорости записи 300 Мб/с и времени доступа менее 50 мс. Такие характеристики приведут к созданию компактных петабитовых голографических дисков. Компания анонсировала выпуск в 2018 году голографического диска нового поколения. Коммерциализация новой технологии впервые откроет путь к сверхплотной записи оптической информации, которая

сможет конкурировать с жесткими дисками в самом ближайшем будущем.

Несмотря на заявления компании Akonia Holographics LLC о создании в скором будущем 3D голографической памяти с емкостью порядка 8 Тб/дм^2, скоростью считывания до 200 МБ/с, стоимостью $10/Тб; случайным временем доступа 30 мс и временем жизни 50 лет; с высокой вероятностью этот вид памяти в отличие от других (в том числе оптических) методов будет использоваться преимущественно для резервного копирования [5.157, 5.158].

Оптимизм в отношении архивных голографических систем заметно укрепился несколько лет назад благодаря прогрессу в элементной базе — прежде всего созданию новых светочувствительных материалов для объемной голографии, таких как безусадочные фотополимеры от Aprilis и InPhase, а также лазеров, модуляторов, фотоприемников. В ближайшем будущем основные усилия компаний, специализирующихся на голографической записи данных, будут направлены на разработку и внедрение технологии квадратурного гомодинного детектирования, в котором опорный и предметные пучки смещены по фазе на 90° [5.157, 5.158]. Akonia Holographics LLC планирует удвоить емкость существующих голографических носителей благодаря существенному уменьшению отношения сигнал/шум. Другая технология — фазовое квадратурное голографическое мультиплексирование — позволяет использовать фазу голограммы для увеличения плотности записи данных.

По предварительным оценкам, обе технологии смогут увеличить скорость записи оптической информации в 4–10 раз. Дальнейшее развитие голографических технологий нацелено на развитие «атомной голографии» (Rewritable 3D Volume Atomic Holographic Optical Storage NanoTechnology, Colossal storage, Inc.), в которой запись осуществляется ультрафиолетовыми лазерами в электрооптических кристаллах [5.204]. Планируется достичь фантастической емкости записи данных — 600 Тб/дм^2 при скорости передачи 10 ТБ/с.

Барьеры развития — научные и технологические

На производительность платформ голографической записи оказывает влияние структура среды. Компании Akonia Holographic LLC, Bell Labs и InPhase Inc. активно разрабатывают двухкомпонентные композиты, состоящие из полимерной матрицы, в которую внедрены свободно перемещающиеся по объему мономерные звенья. Полимеризация под действием света фиксирует их в матрице и, таким образом, записывает информацию. Этот подход недавно был успешно модифицирован и получил название DRED (dynamic range enhancing dopant) технологии. Вместо фиксирования путем перепутывания полимеризованных цепочек, мономеры ковалентно присоединяются к основной матрице. Такой подход значительно улучшает стабильность записывающей среды и увеличивает время ее жизни. Эта технология одноразовой записи является перспективной для внедрения и масштабирования архивной оптической памяти, которая основана на необратимых фотохимических реакциях [5.205]. Альтернативными записывающими средами являются фотохромные материалы, в которых наблюдаются фотоиндуцированные эффекты дихроизма и двулучепреломления. Такие материалы недороги в изготовлении, и могли бы активно использоваться при коммерческой реализации голографической памяти. Однако в обоих типах материалов могут возникнуть трудности с воспроизведением информации — фотополимерные записывающие среды могут исказить данные из-за усадки, а фотохромные — из-за сверхчувствительности к средней локальной интенсивности. Одним из преимуществ подходя является возможность утилизации любых оставшихся после записи на фотополимере мономеров без ущерба для записанных голограмм.

Наряду с выбором подходящего материала для записи информации голографическим методом, существует другая проблема — сложность используемой оптической системы. Для голографической памяти не подходят лазеры на базе полупроводниковых светодиодов, применяемых в традиционных оптических устройствах, поскольку они обладают недостаточной мощностью и дают пучок с высокой расходимостью. Существуют также конструкционные сложности

голографических приводов, связанные с необходимостью размещения двух оптических систем по разные стороны от носителя информации (первая отвечает за формирование первоначального луча, а вторая — за прием прошедшего через диск измененного сигнала, то есть за считывание информации). Сегодня производителям удалось расположить обе системы с одной стороны от голографического носителя и направить к приемнику вторичный сигнал, поместив отражающий слой на обратной стороне носителя информации. Другая проблема связана с использованием значительной доли объема дискового пространства для коррекции ошибок. Разработчикам компании Sony удалось уменьшить этот размер до 10% общего дискового пространства. Голографические диски, как и первые варианты DVD дисков, должны помещаться в специальные непрозрачные картриджи, которые защищают записывающие среды от прямого попадания солнечного света и таким образом предотвращают потерю данных.

Оценки текущего и потенциального спроса (масштабы рынков)

Ключевыми производителями голографических дисков являются: InPhase Technology (система Tapestry), NTT (система Info-Mica), Plasmon (система UDO), Hitachi (система HROM), Optware (система HVD Pro Series 1000 MAGNUM), Daewoo (система HDDS), а также Akonia Holographics, Sony, Maxwell и др. Выпускаемые сегодня этими компаниями голографические диски остаются слишком дорогими для массового использования, их средняя стоимость составляет $120–160/шт, а средняя цена голографических приводов равна 12–15 тыс. долларов. Сохранение информации гарантируется в течение 50 лет. По данным агентства MarketsandMarkets, объем рынка голографических дисков вырастет до 3.5 млрд. долл. к 2020 году. Совокупный среднегодовой темп роста на рынке голографической памяти составит 51.8% в течение 2015–2020.

Возможный прорыв можно ожидать в разработке оптического диска емкостью до 500 Гб (см. Рисунок 5.15). Это будет достигнуто с помощью увеличения количества записывающих слоев. Компания TDK (Япония) уже анонсировала

выпуск Blu-Ray дисков с 4 слоями, которые обеспечивают емкость 100 Гб. Широко известными зарубежными компаниями по производству компакт-дисков являются Moser Baer, Ritek, CMC и др. В России осуществляется только тиражирование CD, DVD, HD-DVD дисков под брендами (Mirex, A-Media, SKAZY и Трилайн) на импортном оборудовании (MCL-500, STEAG-3503 и т. д.). Российским лидером по производству компакт-дисков является компания Laser Craft. К сожалению, на сегодняшний день в Российской Федерации не существует инновационных компаний по разработке оптических носителей хранения информации. Одной из главных причин является недостаточное финансирование на всех этапах создания инновационного продукта — от НИОКР до первых продаж и масштабирования производства. Например, американская компания Akonia Holographics LLC для создания новой голографической платформы, основанной на мультиплексировании с помощью динамической апертуры [5.157, 5.158], инвестировала в НИОКР 100 млн. долл. на протяжении 10 лет. Это одна из передовых технологий сверхплотной оптической записи данных, достигающая плотности 2 Тб/дм^2 и скорости записи 300 Мб/с.

На каком временно́м горизонте можно ожидать коммерциализации новых технологий

В настоящее время с помощью лабораторных прототипов систем голографической памяти с использованием в качестве регистрирующей среды полимерного материала достигнута плотность записи до 100 ГБ/дм^2, что примерно в 10 раз превышает значения, полученные для побитовой записи на дисках DVD (~10 Гб /дм^2). Постраничная скорость считывания достигает при этом 10 ГБ/с. Однако, как было отмечено выше, в настоящее время системы голографической памяти не дошли до потребителя по причине своей относительно высокой стоимости и больших габаритов. Не решены еще многие проблемы и с системами голографических реверсивных материалов для перезаписываемой памяти. Одна из наиболее острых проблем — крайне низкая чувствительность имеющихся в арсенале исследователей фотореактивных материалов. В ближайшей перспективе (2–3 года) станет понят-

но, смогут ли голографические системы памяти в принципе конкурировать с традиционными оптическими, магнитными и полупроводниковыми запоминающими устройствами.

5.3.6. Квантовая память

Проблемы, решаемые благодаря развитию науки и технологий в анализируемой области

Квантовая память представляет собой качественно иной способ хранения информации, который отличается способностью записывать и считывать сигналы, сохраняя их квантовое состояние. Библиометрический анализ публикационной активности в этой области (см. Рисунок 5.14) демонстрирует экспоненциальный рост на протяжении последних 25 лет. Высокий интерес к новой модели памяти основан на возможности революционного, а не эволюционного скачка в информационных технологиях и в первую очередь решения проблемы «big data». Несмотря на значительное число предложенных теоретических моделей и разработанных экспериментальных макетов, возможность их практического использования остается неопределенной, по крайней мере, в ближайшие 10–20 лет. С другой стороны, решение этой проблемы позволит ответить на один из величайших вызовов, стоящих перед человечеством — создать квантовый компьютер.

Устройства памяти на основе квантовых битов, или кубитов, имеют огромное преимущество перед классическими аналогами, которые используются в современных компьютерах. Классический бит может принимать только два возможных значения — 0 и 1; кубит благодаря эффекту квантовой суперпозиции может принимать не два, а теоретически бесконечное число состояний. Этот эффект позволяет с помощью специальных процедур и алгоритмов записывать и считывать с одного квантового регистра (набора кубитов) несравнимо больше данных, чем в случае классического двоичного регистра.

В большинстве существующих концептов квантовой памяти лежит эффект электромагнитно индуцированной прозрачности (ЭИП) [5.206–5.210]. Запись и считывание

квантовой информации осуществляется с помощью световых импульсов. В качестве среды для записи квантовой информации в основном используют [5.206–5.208] «холодные» атомы, однофотонные световые поля, оптические волокна, квантовые точки, фотонные кристаллы.

В качестве кубитов в различных системах хранения квантовой информации могут использоваться как внедренные в кристаллы редкоземельные ионы, так и частицы атомного пара или охлажденного до сверхнизких температур атомного газа. Информация на выходе полностью повторяет входящую с точностью до фотона, создавая трехмерную голограмму, которая может быть считана и обработана. Из-за неизбежной неопределенности, обусловленной законами квантовой механики, часть исходящей информации будет потеряна при измерении, поэтому полученную голограмму можно прочесть только один раз, что делает данную технологию идеальной с точки зрения информационной безопасности. Теоретически кубит можно сохранить с помощью фотонов, которые изменяют энергетические уровни атомов. Состояние «0» и «1» обеспечивается низкими и высокими уровнями энергии. Однако считывать подобную информацию достаточно сложно — атомы могут разойтись или переизлучить в случайном направлении фотон, содержащий кубит. Подобного рода проблемы могут быть решены с использованием не одного, а серии атомов в состоянии конденсата Бозе-Эйнштейна. Jakob Reichel и его коллеги поместили конденсат между двумя зеркалами, представляющими оптический резонатор для света определенной длины волны. В этом состоянии у атомов отсутствует тепловое движение, а, следовательно, и дрейф. Таким образом, обеспечивается долгое хранение информации.

Основные направления исследований и их применений

В работе [5.211] разработана концепция оптической памяти с использованием сжатого света, который сохраняется в ячейке с парами рубидия в течение 1 мкс [5.212]. В 2015 году была анонсирована новая технология квантовой памяти, основанной на комбинационном рассеянии света атомными

ансамблями для записи и восстановления многомодового перепутанного состояния оптической гребенки в широком диапазоне длин волн [5.213]. В том же году французскими физиками был разработан концепт нового вида расслоенной оптической памяти, основанной на взаимодействии света с облаком охлажденных лазером атомов цезия [5.206]. С помощью ЭИП-эффекта, им удалось замедлить световой импульс в тысячу раз. Полная остановка света осуществляется с помощью взаимодействия фотонов и более 2000 ультрахолодных атомов цезия в течение 5 мкс. Эта технология, возможно, будет использована в качестве квантовой памяти для создания квантовых сетей в ближайшие 10 лет.

Альтернативный подход к реализации квантовой памяти основан на использовании технологии модифицированного светового эха [5.214, 5.215]. В качестве носителя информации предлагается макроскопическая система атомов в газе с неоднородно уширенными резонансными оптическими переходами. При этом записываемые квантовые импульсы света отделяются от дополнительных лазерных импульсов, играющих роль дозаписывающих и восстанавливающих полей. Важным преимуществом предлагаемой техники является разделение во времени «восстановленного» света и исходных лазерных импульсов, что перспективно при переходе к однофотонным полям. Предложенная идея была теоретически изучена на примере квантового состояния однофотонного волнового пакета. Было найдено аналитическое решение для восстановленной волновой функции фотона и показано, что вероятность восстановления может быть близка к единице. Полученное решение показало, что восстановленное состояние фотона может приобретать новые свойства, что делает возможным использование предложенной техники светового эха для решения других задач квантовой информатики. Предложенная техника светового эха открывает принципиально новые возможности в решении проблемы квантовой памяти и развитии новых методов когерентной квантовой оптической спектроскопии [5.214]. Преимуществами квантовой памяти на фотонных эхо-сигналах являются высокая скорость и широкая полоса пропускания. За последнее десятилетие изучены механизмы изменения фазы фотонных эхо-сигналов для реализации квантовой памяти.

Были преодолены фундаментальные ограничения, такие как инверсия и низкая эффективность поиска информации в модифицированных схемах для фотонного эха. Все же, время хранения фотонов все еще слишком мало, чтобы применить его к технологии квантовых коммуникаций.

Группой проф. Калачева А. А. (КФТИ КНЦ РАН, Казань) предложена новая схема оптической квантовой памяти на основе нерезонансного рамановского взаимодействия слабого (однофотонного) светового импульса и сильного контрольного поля в протяженной многоатомной системе. Показано, что форма слабого оптического импульса может быть записана и воспроизведена с помощью угловой модуляции волнового вектора контрольного поля [5.216]. Предложенная схема математически эквивалентна оптической квантовой памяти на основе фотонного эха с продольным градиентом неоднородного уширения резонансного перехода, позволяя совместить два подхода: нерезонансное рамановское взаимодействие и градиентное эхо. Разработанный метод не требует синхронизации контрольного поля с однофотонным импульсом, и может быть реализован в системах, которые не позволяют использовать линейный эффект Штарка или Зеемана для управления неоднородным уширением.

В первых экспериментах по демонстрации оптического градиентного эха использовалось спектральное выжигание в широких неоднородных линиях Eu31: Y2SiO5 [5.217] и Pr31: Y2SiO5 [5.218]. Аналогичный эксперимент был выполнен в диапазоне телекоммуникационных длин волн с использованием Er31: Y2SiO5 [5.219]. Также были предложены схемы реализации квантовой памяти, позволяющие хранить световое поле в ансамбле двухуровневых атомов. Они аналогичны методике градиентного эхо-сигнала, но эффективность таких схем порядка 15% [5.220].

Барьеры развития — научные и технологические

В последнее время квантовая память интенсивно изучается для применения при обработке информации, особенно для реализации повторителей в каналах связи [5.221, 5.222]. Для работы ретрансляторов квантовая память должна обеспечить сверхдлинное время хранения фотонов (около 1 с) с не-

классической точностью выше 67% [5.223, 5.224]. Несмотря на интенсивную работу в течение последних десятилетий, в силу физики данного процесса получить удовлетворяющие этим требованиям изделия не представляется возможным. Фундаментальное ограничение на время хранения фотонного эха — фаза и время затухания оптического перехода [5.225]. Другим ограничением фотонных эхо-сигналов является абсорбция — причина сверхнизкой эффективности извлечения данных [5.226]. В последнее время некоторые исследовательские группы пытались решить данные проблемы [5.227, 5.228]. В результате, проблема точности поиска и повышения эффективности была решена. Проблема короткого времени хранения остается нерешенной — время хранения в большинстве редкоземельных легированных твердых тел составляет менее миллисекунды [5.229]. В газообразных средах время хранения намного короче, порядка 1 нс. [5.230]. В полупроводниках время жизни фотона еще меньше (1 пс) [5.231].

Оценки текущего и потенциального спроса (масштабы рынков)

Развиваемые в настоящее время экспериментальные проекты находятся на разных стадиях и зачастую их сравнение носит весьма условный характер. Несмотря на бурное развитие квантовой памяти (см. Рисунок 5.15), сегодня говорить о создании коммерческих прототипов преждевременно. Среди многочисленных разработок следует отметить подходы на основе атомных частотных решеток в кристаллах, допированных редкоземельными элементами, развиваемые в Университетах Женевы (Швейцария) и Лунда (Швеция) [5.232].

В этих исследованиях удалось с высокой воспроизводимостью (~97%) и эффективностью достичь хранения квантовой информации в течение 30 сек. Эта технология будет востребована при создании источников одиночных фотонов, квантовых повторителей и протоколов, обеспечивающих эффективную редукцию коммуникационной сложности [5.206].

Несмотря на бурный рост числа публикаций в данной области (см Рисунок 5.15) оценивать объем и структуру рынка

с использованием квантовых технологий записи и хранения информации преждевременно. Учитывая специфику квантовой памяти, очевидно, что ее главным применением будет динамическая оперативная память в квантовых (оптических) компьютерах.

На каком временно́м горизонте можно ожидать коммерциализации новых технологий

Несмотря на усилия научно-исследовательских групп по всему миру, включая Российскую Федерацию, и развитие инфраструктуры для внедрения и масштабирования квантовых технологий (Российский квантовый центр, венчурный фонд D-Wave, и др.) говорить о коммерциализации квантовых технологий записи и хранения информации преждевременно. По разным оценкам для этого потребуется не менее 10–20 лет. Пожалуй, единственным сегодня коммерчески оправданным применением квантовых технологий является реализация криптографической системы на основе квантовой телепортации.

5.3.7. Заключение

Несмотря на значительный прогресс в области хранения информации с использованием оптических технологий, лидирующие позиции на рынке по-прежнему занимают жесткие диски и флэш-память. В настоящем отчете флэш-память не рассматривалась, но следует отметить, что в среднесрочной перспективе ее развитие будет продолжаться высокими темпами. Это связано с новой технологией интеграции транзисторов в каждую ячейку трехмерного стека на чипе [5.152]. Усилия ряда производителей (Samsung, Intel и др.) направлены на совершенствование технологии 3D NAND. В 2015 году начала активно развиваться флэш-память на основе многоуровневых ячеек (MLC), в которые интегрированы четыре области напряжений [5.193], обеспечивающие, таким образом, удвоенную плотности записи. Рассмотренные выше модификации жестких дисков сохранят лидерство (Seagate, Hitachi, Western Digital) на протяжении еще 3–5 лет благодаря более низкой стоимости хранения единицы информации

и длительному сроку службы физического носителя. Более экзотические виды памяти, такие как память на мемристорах и спиновая память (STT-RAM) (см. Таблица 5.3) вряд ли могут претендовать на массовое производство в обозримом будущем, хотя безусловно такие разработки положительно влияют на текущие тренды в создании устройств хранения данных.

Прогресс информационных технологий требует непрерывного увеличения информационной емкости носителей информации и скорости их работы. Перспективы повышения информационной емкости оптических дисков связаны с созданием многослойных светочувствительных покрытий для побитовой регистрации информации и толстых (более 2 мм) светочувствительных слоев для голографической записи. Такие диски могут обеспечить реализацию трехмерной (3D) оптической памяти с плотностью более 1 ТБ/см^3 за счет двухфотонной технологии в случае побитовой оптической памяти или, в случае голографической оптической

Таблица 5.3 — Сравнительный анализ основных характеристик различных видов памяти.

	HDD	Флэш-память	DRAM	Фазовая память	Мемристор	STT-RAM
Площадь чипа на бит, F²	н/д	4–8	6–8	8–16	4	14–64
Энергия на бит (пДж)[2]	10^5–10^7	10^1–10^4	2–4	2–100	0.1–3	0.1–1
Время чтения (нс)	5–8 x 10^6	25000	10–50	20–70	<10	10–30
Время записи (нс)	5–8 x 10^6	200000	10–50	50–500	20–30	13–95
Срок эксплуатаци	10 лет	10 лет	<1 с	<10 лет	>10 лет	недели
Число циклов перезаписи	10^{15}	10^3–10^5	>10^{17}	10^7–10^8	10^{12}	10^{15}
3D совместимость	н/д	да	нет	нет	да	нет

Источник: [5.193]

памяти, за счет различных угловой ориентации активирующего и восстанавливающего лазерного излучения. Разработка таких оптических дисков связана с использованием светочувствительных органических сред, испытывающих фотохимические превращения. По сравнению с используемыми в настоящее время термочувствительными материалами такие среды обладают более высокой разрешающей способностью. Потенциальный прорыв в оптических технологиях записи и хранения информации будет связан с трансформационной оптикой и созданием мета-поверхностей, функционирующих на принципах активной плазмоники [5.152]. Наряду с задачами записи и хранения оптической информации, большое значение имеет информационная безопасность, построенная на принципах оптического взаимодействия. Используя различные характеристики лазерного излучения, такие как интенсивность, моды высокого порядка, поляризацию и орбитальный момент можно реализовать криптографические схемы любой сложности. Таким образом, рассмотренные в настоящем разделе современные подходы к управлению светом для хранения данных могут быть эффективно применены в области оптоинформатики.

Можно сказать, что практическое развитие устройств хранения данных происходит постепенно и эволюционно. Другая картина наблюдается в области фундаментальных исследований физических принципов функционирования памяти, а именно, имеет место взрывной рост числа предложений, концептов, механизмов и моделей. Очевидно большинство из них останутся в зачаточном состоянии, однако их ценность может оказаться неоспоримой в поиске инновационных решений для энергонезависимой, дешевой, компактной и долговечной памяти. Оптические технологии начинают играть все большую роль в самых разных отраслях экономики. Простой сравнительный анализ жестких и оптических дисков демонстрируют явные преимущества последних. Например, на чтение/запись в оптических устройствах расходуется на треть меньше энергии. В режиме «простоя» энергонезависимые оптические диски имеют сильное конкурентное преимущество. В Таблице 5.4 показана временная динамика расходования энергии жесткими и оптическими дисками. Мы наблюдаем значительную экономию в энергии

уже на горизонте 20 лет. Немаловажным фактором является срок службы устройств хранения информации. Оптические диски имеют значительный запас прочности по сравнению с жесткими.

Благодаря переходу от жестких дисков к оптическим стоимость хранения информации может быть уменьшена на два порядка с $1 до $0.01 за 1 Гб. На протяжении двух десятилетий сформировался гигантский рынок (десятки млрд. долларов в год [5.152, 5.153, 5.155]) обычных оптических дисков в индустрии развлечений и IT-индустрии. Оптическая память нового поколения, благодаря высокой энергоэффективности и большей емкости позволит сформировать прорывную технологическую платформу для самых разных отраслей экономики по всему миру. Однако главным драйвером рынка будет выступать ставшая актуальной в наше время парадигма «big data», способная капитализировать информационный рынок (связь, хранение, вычисления и безопасность) до 30 млрд. долл. ежегодно [5.152–5.155].

Перспективным системам оптической памяти на съемных носителях приходится выдерживать жесткую конкуренцию не только с другими формами локального сохранения информации, такими как магнитная и полупроводниковая, но и с относительно новой концепцией распределенного хранения информации, которая становится все более привлекательной с широким распространением высокоскоростных сетевых технологий, в том числе беспроводных. Появляются новые технологии хранения информации, например, «наномеханическая», по идее близкая к архаичной записи информации на перфокартах, но с использованием современной

Таблица 5.4 — Сравнительный анализ записывающих сред.

Годы	2	5	10	20	50	100
HDD (кВтч)	8760	21900	43800	87600	219000	438000
Оптический диск (кВтч)	2628	2628	2628	2628	2628	2628
Экономия энергии	70%	88%	94%	97%	98.8%	99.4%

Источник: [5.157, 5.158]

атомно-силовой техники, демонстрирующая очень высокую плотность записи (300 ГБ/дм^2), правда, при пока низкой скорости в 60 кб/с.

По данным аналитического центра Gartner драйвером развития рынка хранения информации выступает азиатско-тихоокеанский регион, который растет в среднем на 5.3% в год и объем которого достиг в 2015 году почти 5 млрд. долларов [5.152]. Китай представляет собой самый быстрорастущий рынок в регионе — в 2016 году, по оценкам агентства, он вырастет на 11.7%, Индонезия — на 8.2%, Сингапур — 4.4%. В то же самое время Индия будет расти низкими темпами — на уровне 2.1%. Отрицательную динамику покажет Австралия: −5%, главной причиной спада является переориентация на облачные технологии хранения данных. С точки зрения глобальной тенденции развития технологий записи и хранения информации ключевые ниши в ближайшие 5 лет будут занимать флэш память для потребительского сектора и HDD память для расширения инфраструктуры облачных сервисов.

5.4. Квантовые компьютеры и симуляторы, контроль квантовых состояний

5.4.1. Введение

Современные квантовые технологии и методы создания и контроля квантовых состояний изолированных квантовых систем открывают путь к созданию принципиально новых приборов и устройств. В настоящее время широко обсуждаются вычислительные средства нового поколения, основанные на квантовых методах обработки информации с использованием отдельных фотонов как оптического, так и микроволнового диапазонов. Квантовые вычисления представляют собой одну из наиболее бурно развивающихся и перспективных областей развития науки и техники [5.233].

В сравнении с привычными нам компьютерами, идея квантового компьютера основана на совершенно ином принципе [5.234, 5.235] параллельного представления и обработки данных, основанном на законах квантовой механики. Благодаря точной и однозначно определенной природе

квантовых состояний, отдельные квантовые объекты (атомы, электроны, фотоны и пр.) могут содержать в себе логические элементы информации. Например, если квантовый объект может находиться в двух стационарных состояниях, эти состояния можно обозначить как логические значения |0> и |1> и применять к ним математическую логику обработки информации. Такой объект (в терминах квантовой механики — двухуровневая система) называется квантовым битом (кубитом), фундаментальным элементом квантового кодирования информации. В отличие от обычного бита классической цифровой информации, кубит может находиться не только в одном из двух состояний |0> или |1>, но и в суперпозиции этих квантовых состояний $\alpha(t)\cdot|0> + \beta(t)\cdot|1>$, где зависящие от времени t величины α и β представляют собой весовые коэффициенты состояний |0> и |1>. Таким образом, пространство возможных состояний одного кубита имеет размерность 2, а их количество, вообще говоря, бесконечно. Если же рассматривать систему из N кубитов, то пространство состояний имеет размерность 2^N, что является огромным ресурсом для выполнения параллельных вычислений. В отличие от классического представления информации, изменение состояния одного кубита может изменять сразу все состояния квантового регистра из N кубитов (перепутанные состояния). Это свойство часто называют квантовым параллелизмом, который является важнейшим практическим преимуществом квантового компьютера. Известным примером задачи, требующей значительных вычислительных ресурсов, является разложение числа на простые множители. Время решения этой задачи с использованием обычных классических алгоритмов растет экспоненциально с увеличением длины числа на входе. Квантовый алгоритм Шора [5.236] позволяет решать такую задачу намного эффективнее, что было продемонстрировано на примере простых экспериментов [5.237].

Помимо универсальных квантовых компьютеров, не менее перспективным направлением в области квантовой обработки информации является создание квантовых симуляторов — устройств, способных эффективно выполнять только определенные квантовые алгоритмы, как, например, расчет динамики других квантовых систем [5.238, 5.239]. Ожидается, что квантовые симуляторы позволят исследовать структуры

химических соединений и новых материалов гораздо точнее и быстрее, чем это могут проделать классические компьютеры с использованием наиболее совершенных алгоритмов [5.240]. Квантовые симуляторы откроют дорогу к принципиально новым методам инженерии материалов. Кроме того, квантовые симуляторы могут быть использованы в других областях науки и техники, в частности для задач оптимизации, квантовохимических расчетов и поиска в больших базах данных. Ожидается, что квантовые симуляторы смогут моделировать динамику очень сложных многокомпонентных квантовых систем, таких как новые материалы для энергетики, лекарственные средства, высокотемпературные сверхпроводники, природные материалы фотосинтеза и многие другие [5.241].

Является общепризнанным, что система, предназначенная для создания квантового компьютера, должна удовлетворять следующим критериям, сформулированным Дэвидом Дивинченцо [5.242]:

- возможность приготовления начального состояния кубитов (инициализация);
- наличие четко определенных кубитов и возможность увеличения их числа (масштабирования) до любого размера системы;
- время квантовой когерентности системы должно быть значительно больше, чем время, требуемое для выполнения отдельных квантовых логических операций;
- реализация универсального набора квантовых элементов, с помощью которого могут быть составлены все квантовые операции;
- возможность измерения отдельных кубитов.

Необходимость передачи квантовой информации на значительные расстояния (квантовая коммуникация) налагает дополнительное требование возможности преобразования квантовых состояний стационарных кубитов в перемещаемые (фотоны) и обратно. Перемещаемые кубиты могут при этом передаваться между определенными удаленными друг от друга местоположениями.

5.4.2. Основные направления исследований и их применений

К настоящему времени экспериментально реализованы различные кубиты и системы кубитов, удовлетворяющие большинству критериев Дивинченцо. Таким образом, существует разнообразие подходов к созданию квантового компьютера. Каждый из этих подходов имеет свои преимущества и недостатки.

Ионы в ловушках

Одним из экспериментальных способов создания квантового компьютера является использование ионов, захваченных в ловушках [5.243]. Эта идея основана на работе Сирака и Цоллера [5.244], опубликованной в 1995 году. Квантовые регистры кубитов, с помощью которых обрабатывается квантовая информация, состоят из цепочек ионов, как правило, щелочных металлов. Из множества состояний иона выбираются лишь два отдельных состояния (уровня энергии), в которых он может находиться. Оставшиеся уровни должны быть незанятыми, однако это не всегда гарантировано из-за интерференции. Кубиты могут быть реализованы двумя способами: либо на двух уровнях зеемановского расщепления (сверхтонкой структуры иона), либо на запрещенном оптическом переходе. На настоящий момент была продемонстрирована возможность помещения до 14 ионов в ловушки. Ионные цепочки могут быть переведены в основное состояние в потенциале ловушки охлаждением. Определенные уровни сверхтонкой структуры приводят к средним временам когерентности («жизни» кубитов) до 10 минут в случае отсутствия чувствительности к магнитным полям. Для оптических переходов ограничивающим фактором является самопроизвольный распад состояний, но тем не менее это время удается сделать на порядок больше, чем время, необходимое для одной операции с кубитом.

На сегодняшний день точность выполнения наиболее важных одно- и двухкубитных операций с ионами в ловушках достигает высокого уровня (до 99%), и теперь становится возможным создание перепутанных состояний, важных

для квантовой обработки информации. Для их измерения применяется зависимое от состояния иона рассеяние света, что позволяет достичь эффективности детектирования до 99,99%. Для передачи квантовой информации от ионов к фотонам и наоборот используется технология квантовой электродинамики в резонаторе. Ионы, расположенные далеко друг от друга, могут взаимодействовать (быть перепутаны) с помощью резонатора. Ионы также могут быть смещены механически на малые расстояния внутри самого квантового процессора [5.245].

Ионные двухуровневые системы с их длительными временами когерентности пригодны для использования в качестве квантовой памяти. Удобные методы измерения и наличие универсального набора квантовых манипуляций, из которых могут быть сгенерированы любые вычислительные операции, делают ионные ловушки хорошей отправной точкой для построения первых квантовых симуляторов [5.246]. Тем не менее, остается нерешенной проблема флуктуирующих электромагнитных полей и спонтанного распада состояний, приводящих к декогеренции.

Нейтральные атомы

Квантовые компьютеры и симуляторы также могут быть реализованы на нейтральных атомах (или молекулах) при использовании в качестве кубитов долгоживущих внутренних состояний атомов [5.247]. Эти состояния можно избирательно подвергать световому или микроволновому воздействию. Благодаря методу лазерного охлаждения и конденсации Бозе-Эйнштейна, техника захвата охлажденных атомов сейчас хорошо развита и позволяет получать высококачественные квантовые регистры. Квантовые вычисления с нейтральными атомами основаны на новых технологиях ловушек, в которых возможно индивидуальное управление движением отдельных атомов. В настоящее время можно управлять большим количеством кубитов параллельно, например, в оптических решетках, что особенно важно для моделирования твердотельных систем [5.248]. Квантовая запутанность может быть создана в системах нейтральных атомов двумя механизмами: взаимодействием двух частиц под действием

дипольных сил между сильно возбужденными (ридберговскими) состояниями, в результате чего детерминистически происходит запутывание, и обменом фотонов, который создает запутанность только с некоторой вероятностью. Оба механизма осуществимы как в свободном пространстве, так и в резонаторе. Атомы при этом хранятся в оптических решетках или в цепочке ловушек. Эволюция атомов во времени описывается с помощью модели Хаббарда, согласно которой атомы прыгают по узлам кристаллической решетки и взаимодействуют через столкновения. Таким образом, холодные атомы позволяют моделировать твердотельные многокомпонентные системы. Атомный конденсат Бозе-Эйнштейна также может быть размещен в оптической решетке, в этом случае фазовые переходы наблюдаются между сверхтекучей фазой и диэлектрической фазой Мотта [5.249]. В последней в каждом узле решетки может располагаться только один атом, что приводит к существованию очень большого числа атомных кубитов, которые тоже могут быть запутаны друг с другом. Такая конфигурация представляет собой основу для квантового симулятора, например, для спиновых решеток. При этом временная эволюция в виде последовательности одно- и двухкубитных операций может быть выполнена на всех кубитах одновременно. Важной разработкой является возможность отображения отдельных атомов в оптической решетке и, по меньшей мере, частичный их контроль. Однокубитные квантовые операции над нейтральными атомами выполняются посредством рамановских переходов в двухчастотном лазерном поле или магнитодипольных переходов в СВЧ-поле. Двухкубитные операции могут выполняться путем кратковременного лазерного возбуждения атомов в высоколежащие (ридберговские) состояния вблизи границы ионизации, которые обладают большими дипольными моментами и обеспечивают сильное диполь-дипольное взаимодействие.

Нейтральные атомы могут быть использованы для хранения квантовой информации благодаря низкой чувствительности к воздействиям окружающей среды. Тем не менее, в настоящее время доступны лишь очень слабые ловушки с невысокой потенциальной энергией, которые требуют охлаждения атомов до очень низких температур.

В предложенных несколькими группами атомных микросхемах [5.250] (atom chip) атомы захватываются электромагнитным полем вблизи поверхности и охлаждаются. Благодаря малым размерам микросхем и устойчивости в них атомов данный подход в отдаленной перспективе пригоден для построения достаточно больших квантовых процессоров.

Фотоны

Принципиально возможен способ построения квантового компьютера с применением фотонов. При этом состояния кубита задаются поляризацией фотонов. Колебания электромагнитного поля, горизонтальные и вертикальные, соответствуют здесь состояниям кубита |0> и |1>, причем любая суперпозиция этих состояний также возможна. Поляризацией можно легко управлять при помощи таких оптических элементов, как волновые пластинки. Другими вариантами реализации кубитов являются, например, число фотонов, их пути или времена прибытия. Фотоны имеют высокую мобильность и слабо взаимодействуют с окружающей средой, что дает возможность их использования без сложных требований изоляции (вакуум, охлаждение). Фотонные кубиты обладают большим временем когерентности, что означает, что они не теряют свои квантовые свойства в течение длительного периода времени. Тот факт, что они движутся со скоростью света, делает их идеальными носителями квантовой информации. С сегодняшними технологиями есть возможность выполнять операции запутывания нескольких кубитов с высокой точностью [5.251].

Существенное ограничение квантового компьютера, основанного на фотонах, состоит в том, что фотоны практически не взаимодействуют друг с другом и с окружением. Это препятствует квантовому запутыванию различных кубитов друг с другом, необходимому для выполнения расчетов. В настоящее время такое запутывание кубитов может быть реализовано лишь с некоторой вероятностью. Масштабирование систем с кубитами на основе фотонов также проблематично, так как вероятность правильной работы всей системы определяется произведением вероятностей правильной работы отдельных вентилей, и, таким образом, быстро убывает

с ростом их числа при наличии неизбежных ошибок, связанных с конечной вероятностью запутывания. Для увеличения вероятности срабатывания двухфотонных гейтов необходима разработка нелинейных оптических элементов на однофотонном уровне и их последующая интеграция в оптическую квантовую схему. Существующие оптические квантовые технологии опираются на линейные оптические элементы [5.252].

Сложность фотонных квантовых схем, которые в настоящее время могут быть созданы, весьма ограничена из-за громоздкости и дороговизны требуемых квантово-оптических компонентов. Другой нерешенной проблемой является реализация хранения квантовых состояний фотонных кубитов. Фотоны движутся со скоростью света, при том что многие алгоритмы требуют хранения информации. Квантовая память может быть использована для реализации надежных источников единичных фотонов [5.253]. Кроме того, квантовые компьютеры также должны иметь возможность измерения кубитов. Для этого необходимы детекторы, которые смогут надежно регистрировать одиночные фотоны. Пока это не представляется возможным по причине невысокой эффективности детекторов, хотя значительный прогресс был достигнут в этой области в последние несколько лет с использованием сверхпроводников.

Кубиты на дефектах в полупроводниках и диэлектриках

Пространственно распределенные электронные состояния в кристаллах имеют слишком малые времена распада, чтобы быть полезными для обработки квантовой информации. Для обеспечения максимально возможной когерентности, возбуждения в твердых телах должны быть пространственно локализованы. С одной стороны, эта локализация приводит к дискретному спектру возбуждения, аналогичному спектру атома. Локализация также в определенной степени защищает его от внешней среды. Существует два основных вида возможных кубитных систем: квантовые точки, в которых свободное движение носителей заряда ограничено по всем пространственным направлениям и примесные атомы

в неоднородных кристаллах. В обоих случаях зарядовые состояния оказываются непригодными для реализации кубитов из-за неизбежного фонового зарядового шума. Именно поэтому в настоящее время исследования кубитов ориентированы в первую очередь на локализованные спиновые состояния.

Существуют различные методы формирования квантовых точек [5.254]. Несколькими группами исследуются структуры, в которых носители заряда в двумерном электронном газе на поверхности полупроводника локализованы между металлическими затворами при помощи электрических потенциалов. С другой стороны, для оптических исследований более пригодны самоорганизованные квантовые точки, так как они сильно взаимодействуют с оптическими фотонами благодаря своему малому размеру (несколько десятков нанометров). В обоих случаях, несколькими группами в последние годы были разработаны методы для инициализации кубитов и манипуляций с ними, которые показывают когерентную динамику спинов. Общеизвестно, что арсенид галлия, относящийся к полупроводникам группы $A^{III}B^{V}$, позволяет изготавливать квантовые точки высокого качества. Однако проблема этого материала применительно к кубитам заключается в высоком значении ядерного спина атомов в кристалле. Сверхтонкое взаимодействие спиновых носителей заряда с ядерным спином ограничивает времена когерентности до долей микросекунд. Увеличение этого времени остается нерешенной проблемой. Перспективной возможностью является использование материалов, не обладающих ядерным спином — таких, как изотопно чистый кремний или графен.

Некоторые предложенные реализации кубитов используют введение в кристалл атомов-примесей. В качестве одного из вариантов был предложен кремний, легированный фосфором. Здесь кубит определяется спином внешнего электрона фосфора. В этом случае сверхтонкое взаимодействие с ядерным спином фосфора не обязательно будет вредным, так как квантовая информация хранится в ядерном спине и может быть прочитана с помощью взаимодействия с электронным спином. Этот эффект может обеспечить хорошую квантовую память, так как время когерентности ядерного спина может быть весьма большим — в диапазоне от нескольких минут до

часов. Эксперименты австралийской группы [5.255] показывают, что электронные спины в изотопно чистом кремнии могут демонстрировать времена когерентности в десятки минут при комнатной температуре. Таким образом, по отношению к собственным свойствам диэлектрических кристаллов, примеси могут иметь значительное большие времена когерентности.

Показательным примером кубита здесь являются отрицательные однозарядные комплексы в алмазе, состоящие из одиночных атомов азота, связанных с вакансиями (NV-centers). Во многих экспериментах продемонстрирован ряд их приложений, например, возможность быстрой оптической инициализации и долгоживущая (миллисекунды) когерентность при комнатной температуре, оптическое считывание, а также возможность когерентной манипуляции состоянием [5.256]. Однако на сегодняшний день не ясно, каким образом для примесных кубитов могут быть реализованы многокубитные операции, и как контролировать связь между кубитами.

Наномеханические квантовые системы

В последние годы были достигнуты значительные успехи в управлении наномеханическими резонаторами, которые осциллируют подобно струнам, стержням или мембранам с размерами менее 100 нм. Их резонансные частоты находятся в радио- и микроволновом (СВЧ) диапазоне. Движение наномеханических резонаторов теперь может быть замедлено до квантово-механического основного состояния [5.257]. Используются методы лазерного охлаждения, разработанного для ионных ловушек. У механических наноосцилляторов, состоящих из струн нитрида кремния или углеродных нанотрубок, время декогеренции колебательных мод может превышать доли секунды. Когерентное управление наномеханическим движением осуществляется посредством связи с электромагнитным излучением в оптических или микроволновых резонаторах. Когерентная связь единичных фотонов с единичными модами осцилляций станет в скором времени возможной, например, в резонаторах из углеродных нанотрубок. Возможность когерентного управления

наномеханическим движением посредством электромагнитного излучения также открывает перспективы получения контролируемых фотонами кубитов, для которых есть интересные приложения даже в обычной технике когерентной обработки сигналов. На данный момент также возможны новые практические приложения для датчиков веса, силы и движения. Возросшая вплоть до единичных квантов колебаний чувствительность обещает существенно расширить применение твердотельных квантовых технологий с использованием наномеханических элементов.

Гибридные квантовые системы

В целом, часто сложно определить систему, которая удовлетворяет всем требованиям Дивинченцо по когерентности, связи с окружением и масштабируемости. До определенной степени, это вызвано тем, что эффективные квантовые вычисления требуют значительного расширения системы, что делает ее подверженной помехам. И наоборот, сильно экранированная система делает доступ к хранимой в ней информации гораздо более сложным. Решение может быть найдено с использованием различных платформ для реализации аппаратной части квантового компьютера [5.258]. Использование наиболее подходящей квантовой системы для каждой задачи, индивидуальный подход к квантовой аппаратной части может, таким образом, позволить использовать преимущества различных квантовых систем. Не следует забывать, тем не менее, что это также потребует разработки подходящих интерфейсов между различными квантовыми системами. В качестве примера можно привести использование сверхпроводниковых кубитов и резонаторов совместно с ансамблями ионов редкоземельных металлов [5.259] и примесей в кристаллах алмаза [5.260].

Сверхпроводящие кубиты

Наличие электрического сопротивления приводит к потере информации, передаваемой носителями тока. В металле, охлажденном ниже температуры сверхпроводящего перехода, система электронов проводимости переходит в макроскопи-

ческое квантовое состояние, в котором полностью отсутствует сопротивление. Таким образом, в сверхпроводящих схемах отсутствуют потери. Для создания кубитов в таких системах могут быть использованы различные квантовые величины (электрический заряд, магнитный поток). Важнейшими компонентами сверхпроводящих кубитов являются джозефсоновские переходы, представляющие собой тончайшие слои диэлектрика, расположенные между слоями сверхпроводника. В отличие от описанных выше микроскопических кубитов, состоящих из отдельных атомов или ионов, сверхпроводящие кубиты состоят из миллиардов электронов и видимы невооруженным глазом — их размеры имеют масштаб микронов и даже миллиметров. Сверхпроводящие квантовые схемы позволяют получать отдельные квантовые состояния как для магнитного потока, так и для зарядов, расположенных на сверхпроводящих электродах. Этими квантовыми состояниями можно управлять, изменяя приложенное напряжение или магнитное поле. Примерами сверхпроводящих квантовых схем являются зарядовые, потоковые и фазовые кубиты [5.261]. Зарядовые кубиты контролируются электрическим потенциалом затвора и требуют весьма малых размеров компонентов сверхпроводящих схем. В отличие от зарядовых кубитов, потоковые и фазовые кубиты контролируются магнитным полем, создающим магнитный поток в сверхпроводящем кольце с джозефсоновскими переходами. Кубиты могут взаимодействовать друг с другом посредством как индуктивной, так и емкостной связи. Из-за низких энергий возбуждения сверхпроводящие кубиты управляются не оптическими, а микроволновыми сигналами (фотонами СВЧ диапазона), и по этой причине должны работать при температурах значительно ниже одного градуса Кельвина.

Сверхпроводящие кубиты считаются в настоящее время наиболее перспективной элементной базой для построения квантового компьютера. Благодаря усилиям лидирующих международных научных групп США и Европы, за последние 15 лет времена когерентности этих квантовых систем удалось увеличить в сотни тысяч раз — от нескольких наносекунд до сотен микросекунд. При этом времена элементарных квантовых операций с этими кубитами составляют всего лишь десятки наносекунд, то есть за характерное время квантовой

«жизни» кубита с ним можно произвести до нескольких тысяч операций. Основное преимущество сверхпроводящих кубитов состоит в сравнительной простоте изготовления с использованием стандартных для обычной полупроводниковой электронике методов напыления тонких пленок и нанолитографии, и проистекающей из этого простоте масштабирования. Простота управления и считывания состояний сверхпроводящих кубитов определяется наличием сильной связи с «квантовыми шинами» в виде микроволновых резонаторов [5.262, 5.263].

Микроволновые сигналы используются для контроля и изменения квантовых состояний кубитов. Важность и перспективность этого направления подтверждается большой активностью научных групп и огромным объемом публикаций, в том числе, в самых цитируемых научных журналах.

5.4.3. Барьеры развития области — научные и технологические

Каждый из описанных выше подходов для реализации кубитных устройств имеет свои достоинства и недостатки, а для развития многих из них существуют труднопреодолимые барьеры. В частности, несмотря на то, что квантовая обработка информации ионами в ловушках отвечает большинству требований для создания квантового компьютера, увеличение количества кубитов с сохранением их индивидуального контроля, требует колоссальных аппаратурных ресурсов и не позволяет использовать многослойную архитектуру процессора. Существующие лабораторные установки чрезвычайно громоздки. В случае ионных решеток остаются нерешенными проблемы флуктуирующих электромагнитных полей, спонтанного распада состояний, а также стабильности лазеров. Похожие проблемы существуют и у устройств с использованием нейтральных атомов. Кроме того, силы, удерживающие атом в лазерном поле ловушки весьма слабы, что требует охлаждения атомов до очень низких температур.

Главным препятствием для построения квантового компьютера, основанного на фотонах, является то, что фотоны практически не взаимодействуют друг с другом, что препятствует выполнению двухкубитных квантовых операций.

Нерешенными проблемами здесь остаются также хранение квантовых состояний фотонных кубитов и повышение квантовой эффективности однофотонных детекторов.

Малые времена когерентности и плохая масштабируемость схем являются основными ограничивающими факторами для полупроводниковых кубитов на квантовых точках. Недавно были продемонстрированы очень обнадеживающие времена когерентности у примесных атомов в кремнии, но пока не ясно, удастся ли в рамках такого подхода построить двухкубитные и более сложные устройства. Сходные проблемы существуют и пока не находят решения для примесей (NV-центров) в алмазе и вакансий в карбиде кремния (SiC). Нерешенной остается принципиальная проблема — как эти системы могут быть масштабированы.

Наиболее перспективным в настоящее время подходом для построения квантового компьютера является использование сверхпроводников. Принципиальные физические барьеры в этой области можно считать преодоленными. Однако реализация квантовых вычислительных устройств на сверхпроводниковых кубитах требует развития тонкопленочных нанотехнологий самого современного уровня, разработки прецизионных низкотемпературных усилителей и других криогенных схем, также основанных на сверхпроводящих элементах, применяемых в настоящее время для развития как квантовой, так и сверхбыстрой (с тактовой частотой сотни ГГц) цифровой сверхпроводящей электроники. В частности, необходима разработка сверхчувствительных микроволновых (СВЧ-диапазона) параметрических усилителей с квантовым уровнем входных шумов, детекторов сверхнизких потоков микроволнового излучения и микроволновых резонаторов сверхвысокой добротности в однофотонном режиме. Здесь необходимо использование криогенных охладителей замкнутого цикла, микроволновых генераторов, приемников и анализаторов. Будущий квантовый компьютер будет представлять собой сложнейшую многоканальную систему, работающую с использованием одновременно излучаемых и принимаемых прецизионных наносекундных импульсов СВЧ. Разработка такого устройства потребует совместной работы специалистов по квантовой физике, инженеров СВЧ и компьютерных специалистов, что приведет к появлению новой специальности — квантовой инженерии.

5.4.4. На каких временных горизонтах и в каких направлениях можно ожидать применения и коммерциализации описываемых новых технологий

Среди многих существующих подходов к реализации квантового компьютера, сверхпроводящие кубиты общепризнанно являются наиболее перспективной и быстро развивающейся элементной базой. Эти кубиты представляют собой идеальную платформу для создания квантовых симуляторов. Во-первых, они масштабируемы, во-вторых, связь между ними контролируема. Так, единственный реализованный к настоящему моменту коммерческий квантовый симулятор [5.264], поставляемый канадской фирмой D-Wave Systems, использует именно сверхпроводящие кубиты. Процессоры D-Wave Systems представляют собой адиабатические квантовые симуляторы на сверхпроводящих кубитах, работающие по методу так называемого квантового отжига [5.265]. Этот метод позволяет «соединять» состояния с локальными минимумами энергии за счет квантового туннелирования между ними и тем самым находить искомое состояние с минимальной энергией всей системы. Следует отметить, что до настоящего времени в научном сообществе идут споры [5.266] о «квантовости» и эффективности работы [5.267] устройств, производимых компанией D-Wave Systems. Можно ожидать, что в ближайшие 3–5 лет на рынке появятся специализированные квантовые симуляторы новых типов, в частности для расчета новых материалов и решения квантовохимических задач.

Практическая реализация устройств, называемых универсальными квантовыми компьютерами, связана с использованием универсального набора квантовых операций (гейтов). Такие устройства позволяют реализовать широкий спектр квантовых алгоритмов. Однако, они должны содержать не менее нескольких тысяч одинаковых кубитов с достаточно большими временами когерентности, а также большое количество управляющих низкочастотных и СВЧ линий, линий считывания и управляющей электроники. Решение этих грандиозных технологических и инженерных проблем может потребовать 10–15 лет интенсивной работы. К на-

стоящему моменту лидирующие мировые научные группы и компании, разрабатывающие сверхпроводящие кубитные схемы, смогли реализовывать и контролировать квантовые логические устройства универсального типа, содержащие до десятка кубитов.

5.4.5. Оценки текущего и потенциального спроса для практических применений

Единственная компания, которая уже сейчас продает квантовые компьютеры-симуляторы — это канадская D-Wave Systems. Их продукты были недавно закуплены компаниями Google, Lockheed-Martin, NASA, а также Лос-Аламосской национальной лабораторией США. Компания Google сообщила в конце 2015 года о выполнении ими алгоритма квантового отжига на квантовом симуляторе D-Wave Systems. По утверждению Google, для выбранной ими специально подобранной задачи выигрыш по эффективности расчета в сравнении с классическим алгоритмом неквантового отжига составил 10^8 раз [5.268].

5.4.6. Ключевые проекты в компаниях: в мире и в России

Разработки канадской компании D-Wave Systems нацелены на увеличение количества кубитов для наращивания мощности их квантовых процессоров-симуляторов, работающих по принципу квантового отжига. В 2015 году этой компанией был анонсирован процессор D-Wave 2, состоящий из более 1000 кубитов.

В отличие от направления, избранного D-Wave Systems, текущие разработки компаний Google и IBM нацелены на построение универсальных квантовых процессоров и необходимых для их работы схем коррекции ошибок, без которых проблематично масштабирование этих устройств. К началу 2016 года, максимальное число используемых кубитов в работающих прототипах устройств составило 9 и 4 кубита соответственно, у Google и IBM [5.269].

Компания Microsoft финансирует исследования по квантовым вычислениям, направленные на решение задачи

искусственного фотосинтеза. Фотосинтез играет ключевую роль в природе. Как природный феномен он хорошо изучен, но рукотворной альтернативы ему не существует. С помощью квантового компьютера можно природу «подменить» — разработать процесс, который позволит химикам самим осуществлять реакцию фотосинтеза.

В России единственной негосударственной организацией, проводящей исследования связанные с квантовыми вычислениями, является в настоящее время Российский квантовый центр (РКЦ). В этой некоммерческой организации проводятся исследования в области квантовой оптики, квантовых схем с использованием сверхпроводящих кубитов, квантовых сенсоров и квантовой криптографии.

Необходимо на государственном уровне стимулировать международное сотрудничество, импортируя отсутствующие в России технологические решения, а также экспортируя отечественные технологии.

6. Фотонные технологии для космических приложений

БУРНОЕ развитие «фотонных технологий» позволяет им распространяться на все новые и новые сферы применений. В частности, большой потенциал технологии фотоники имеют при создании систем и комплексов космического назначения. Поскольку к изделиям космической промышленности предъявляются особые требования по надежности и стойкости к внешним воздействиям, не все новейшие достижения могут сразу найти свое применение. Однако, оперируя уровнями технологической готовности и с учетом поэтапного внедрения новых технологий в разрабатываемой космической технике, можно обеспечить устойчивое улучшение технических характеристик целевой и служебной аппаратуры космических аппаратов.

С учетом практически полной исчерпанности потенциала традиционных технологий при проектировании космической техники, для поддержания устойчивого развития, а также конкурентоспособного уровня российского производства необходимо овладение современными методами и средствами проектирования, а также созданием новых, ранее отсутствующих технологий на российском рынке космической техники.

Необходимо помнить о повышенных требованиях к надежности и радиационной стойкости компонентов на основе фотонных технологий, а также об обязательном наличии летной квалификации таких изделий для обеспечения гарантированного их внедрения в целевой и служебной аппаратуре КА. Для реализации подобной задачи необходимо предложить отраслевую комплексную целевую программу «Фотоника для космоса», включающую четкую дорожную

карту создания и внедрения конкретной номенклатуры изделий фотоники в космическом приборостроении. После окончания разработки такой программы целесообразно провести ее всестороннее обсуждение на научно-техническом совете Роскосмоса, по результатам которого она может быть принята для реализации организациями космической отрасли.

Создание подобной программы позволит консолидировать усилия разработчиков различных ведомств для создания элементной компонентной базы нового поколения для космической промышленности.

Эта часть доклада состоит из двух подразделов. В первом рассматриваются вопросы технологий оптической связи, которые могут применяться для обмена информацией на линиях «КА-КА» или «КА-Земля». Второй посвящен важным для решения задач космической навигации технологиям проектирования различной аппаратуры.

6.1. Оптические системы космической связи

6.1.1. Введение

В последнее десятилетие значительный рост спроса на информацию, полученную при дистанционном зондировании земной поверхности привел к бурному развитию геоинформационных технологий. Навигационные, связные и прочие сервисы [6.1, 6.2] активно используют информацию от спутниковых систем, полученную в различных спектральных диапазонах.

Картографические сервисы, развиваемые поисковыми системами и IT гигантами в разных странах мира, требуют, для поддерживания сервисов в актуальном состоянии, постоянного осуществления съемок земной поверхности в высоком и среднем разрешении в видимом диапазоне. Крупные мировые компании закупают информацию дистанционного зондирования для проведения маркетинговых исследований, на основе которых строят стратегии перспективных преобразований [6.3].

Бурное развитие технологий приборостроения привело к качественному скачку полезных нагрузок космических ап-

паратов для исследования различных физических свойств подстилающей поверхности и толщи атмосферы. Повышение возможностей технологий фотоники позволили, например, создать принципиально новый прибор для мониторинга солености океана и влажности почвы — MIRAS [6.4] и запустить его на космическом аппарате SMOS в 2009 году [6.5]. Космические аппараты программы Sentinel [6.6], которые выступают основой программы Коперник [6.7] также строятся на базе перспективных технологий фотоники.

В разных странах мира производится большое количество космических аппаратов для прогнозирования погоды и мониторинга подстилающей поверхности Земли и ее атмосферы.

Постоянно улучшают свои характеристики радиолокаторы с синтезированной апертурой (SAR). Если первые SAR, которые появились на космических аппаратах серии Алмаз (1981 г.) имели пространственное разрешение 15 м [6.8], то современные радиолокаторы имеют разрешение 1–7 м с полосой обзора 10–70 км.

Характеристики космических аппаратов не ушли сильно вперед по сравнению с 2010 г. Так, на новейших космических аппаратах ДЗЗ, запущенных в 2014 г., пропускная способность радиолиний не превышает 500 Мб/с, а объемы бортового запоминающего устройства — 1.4 Гб.

С учетом проведенного в [6.9] исследования можно сделать следующие предположения относительно перспективного развития приборов дистанционного зондирования: угловое разрешение некоторых космических аппаратов достигнет примерно 0.1 мкрад, что будет соответствовать пространственному разрешению в десять сантиметров, массивы памяти на борту космических аппаратов достигнут размеров в несколько Терабайт, количество бит на пиксель изображения в среднем превысит 13. Общий объем собираемой информации существенно увеличится с учетом возросшей частоты наблюдений, расширением размеров региона мониторинга и улучшением разрешения космических снимков. Постепенно произойдет переход от наблюдений определенной заданной территории к наблюдению всего земного шара в реальном времени [6.10].

Действительно, требования к космическим системам по улучшению покрытия земной поверхности постоянно растут.

Перспективная космическая метеорологическая система JPSS [6.11] (США) проектируется с таким расчетом, чтобы осуществлять 2-х кратное покрытие земного шара за одни сутки.

Функциональность, обычно реализуемая одним «большим» космическим аппаратом, в перспективе, может быть распределена между некоторым числом взаимодействующих между собой «малых» аппаратов [6.10]. Каждый аппарат подобной группировки может иметь ограниченную функциональность, однако, в целом кластер будет выполнять функции единого аппарата. Для поддержания безопасного функционирования такой системы взаимодействующих элементов потребуется совместное управление и синхронизация маневров.

Оптические линии межспутниковой связи представляют собой отличный инструмент для решения задач взаимодействия элементов подобной распределенной системы, особенно с учетом необходимости передачи большого количества данных от каждого абонента [6.12]. Для элементов распределенного космического аппарата, выполняющих роль «основного сервера» и «маршрутизатора» потребуется линия связи с пропускной способностью не менее единиц ГБ/с. [6.13].

При проектировании космических аппаратов для исследований дальнего космоса требуется создать бортовую аппаратуру, удовлетворяющую крайне жестким требованиям по массе, энергопотреблению и геометрическим размерам. Поэтому большие антенны размещаются на Земле, чтобы компенсировать ограничения, предъявляемые к бортовой аппаратуре космического аппарата. В соответствии с [6.14] терминалы оптической связи легче традиционных радиотехнических систем. При условии размещения ретранслирующей станции на МКС или космическом аппарате (вне пределов земной атмосферы), оптическая связь может быть использована как для управления, так и для передачи целевой информации с космических аппаратов дальнего космоса.

Появляются принципиально новые классы приборов, такие как гиперспектрометры [6.15] и альтиметры Ka-диапазона [6.16]. KaRIn [6.17] — радарный интерферометр Ka-диапазона, который будет основой перспективной американской альтиметрической системы SWOT [6.18]. Основным отли-

чием этого прибора от существующих и эксплуатируемых аналогов станет возможность получать информацию о состоянии подстилающей поверхности не только в подспутниковой точке, но и в полосе шириной 100 км. Это станет настоящим прорывом в океанологии и позволит существенно улучшить понимание океанической циркуляции различных пространственных и временных масштабов.

Постоянное развитие приборов дистанционного зондирования неизбежно повышает требования к спутниковым платформам, которые выступают в качестве обеспечительной основы в рамках схемы деления космического аппарата. Постоянно растут уровни электропотребления и объема рассеиваемой тепловой энергии, но основной проблемой становится необходимость доставки всё большего количества информации с космического аппарата на Землю.

Появляются принципиально новые сегменты рынка по предоставлению услуг связи. В современных самолетах в последнее время стала доступной услуга высокоскоростного подключения к сети Интернет непосредственно в процессе полета. Для этого самолеты оснащают связными терминалами X-диапазона (11.2–12.8 ГГц для входящих каналов связи и 14–14.4 ГГц для исходящих). Максимальные скорости передачи до 20 Мб/с для входящих на каждый воздушный объект и 1 Мб/с — для исходящих. Использование оптических линий позволило бы значительно повысить пропускную способность и, следовательно, повысить качество предоставляемых потребителю услуг. При этом необходимо отметить, что поскольку самолет летит над линией облачности и в областях с минимальной турбулентностью, оптический сигнал может приходить без серьезного затухания. Однако для подобных приложений потребуется разработка технологий множественного доступа с использованием оптических фазированных решеток [6.19].

Таким образом, с учетом широкого спектра вероятных потребителей ресурсов космических радиолиний, пропускной способности будет явно недостаточно даже с учетом перспективного перехода к более высокочастотным диапазонам. Кроме того, проблемы высокого уровня зарегулированности частотного ресурса в радиодиапазоне существенно сдерживают развитие систем передачи информации, в том числе космического базирования.

Создание аппаратуры передачи информации в оптическом диапазоне спектра в перспективе может позволить практически полностью решить весь комплекс указанных проблем. С одной стороны, появляется возможность значительно (минимум на порядок) повысить пропускную способность бортовых радиолиний, с другой стороны на данный момент нет существенных юридических ограничений на использование устройств в оптическом диапазоне спектра, поскольку в этой области могут работать сразу несколько приборов одновременно без ущерба для своей функциональности [6.20].

6.1.2. Основные направления исследований и их применений

В целом исследования в части открытых линий оптического диапазона направлены на решение проблем в нескольких областях. Происходит поиск наилучших диапазонов для передачи информации в атмосфере, а также факторов, влияющих на скорость передачи. Исследуются возможности по увеличению скорости передачи и использованию новых схем модуляции сигнала [6.21]. Проводятся исследования в области создания источников и приемников оптического излучения [6.22]. Достаточно серьезную роль играют и аналитические исследования, обосновывающие необходимость внедрения оптических технологий по сравнению с традиционными радиотехническими.

Передача информации в оптическом диапазоне была предложена еще в 60-х годах прошлого века [6.23]. Специалисты корпорации Hughes предложили использовать для этих целей рубидиевый лазер. Последующие эксперименты растянулись на 50–60 лет. Только в начале XXI века был проведен первый космический эксперимент по передаче информации в оптическом диапазоне — SILEX [6.24].

В 2001 году в рамках SILEX были осуществлена передача информации с низкой околоземной орбиты (космический аппарат SPOT-4) на геостационарную орбиту (космический аппарат ARTEMIS). Были достигнуты скорости передачи информации до 2 Мб/с на волне 819 нм [6.25].

Одновременно с передачей информации в открытом космосе с космического аппарата ARTEMIS осуществлялась

передача информации через атмосферу. В том же 2001 году были достигнуты скорости передачи данных до 50 Мб/с с использованием канала 847 нм. В настоящее время уже достигнуты скорости передачи информации до 5.6 ГБ/с, подобная оптическая линия функционирует на борту космических аппаратов TerraSAR-X и NFIRE с использованием канала 1064 нм [6.26].

Для передачи информации в оптическом диапазоне в современном оборудовании используется две частоты, лежащие в сходных по характеристикам окнах прозрачности атмосферы: 1064 нм (282 ТГц) и 1550 нм (193 ТГц). Для оптических линий спутниковой связи канал 1550 нм выглядит предпочтительнее, чем канал 1064 нм, поскольку фоновая засветка в этом канале в 4 раза ниже. Кроме того, меньше влияние турбулентности, которая приводит к увеличению соотношения сигнал/шум [6.27].

В настоящее время рассматривается возможность создания оптических терминалов со скоростями от 30 до 100 ГБ/с. Предварительные расчеты показывают, что апертура «зеркал» подобных терминалов составит 200 мм и 1000 мм, соответственно. В соответствии с энергетическим бюджетом линии можно констатировать, что минимальный угол визирования должен быть не ниже 30° над горизонтом без применения технологий помехоустойчивого кодирования сигналов [6.28].

В работе [6.21] было представлены результаты проведенного эксперимента по передаче информации в оптическом диапазоне в атмосфере со скоростью 1 Тб/с. Показано, что передача информация на такой скорости возможна, но расстояние пока не превышает нескольких сотен метров. В этом исследовании рассматривается возможность использования новой технологии оптических усилителей Erbium-Doped Fibre Amplifers (EDFA), которые могут повысить характеристики, как приемников, так и передатчиков оптического излучения. Кроме того, предлагается рассмотреть возможность мультиплексирования каналов на нескольких длинах волн, что может позволить повысить энергетический потенциал оптической линии.

Общеизвестно, что оптические линии передачи информации блокируются облаками. В Европейском Союзе пошли

путем создания географически распределенной сети станций, которая обеспечивает пространственную диверсификацию возможности приема и является наиболее приемлемым путем обеспечения непрерывной доступности канала связи. Наряду с пространственным распределением приема информации (по аналогии с традиционными радиотехническими системами) проводятся исследования в области создания технологий мультиплексирования оптических линий в интересах повышения пропускной способности системы [6.28].

Причинами недоступности станции (кроме облачности) также могут быть условия сильной турбулентности в атмосфере, наличие солнца в ее зоне видимости, техническое состояние станции или соображения безопасности (например, присутствие самолета на пути распространения сигнала). При этом облачность является доминирующей причиной.

Среднегодовая доступность сети станций, которая определяется вероятностью того, что, хотя бы одна станция не закрыта облаками и доступна для обмена информацией, составляет 99.89% [6.21]. Детальный анализ статистики по облачности в Европе показывает, что ситуация, когда все станции покрыты облаками, может произойти в основном зимой, т. е. для дальнейшего увеличения процента доступности одна станция обязательно должна быть размещена в южном полушарии.

Одна из важных проблем при построении космических оптических систем связи состоит в создании технологии безразрывной передачи информации при переходе от одной земной станции к другой непосредственно в процессе осуществления сеанса связи. Для того чтобы избежать потери данных при переключении, необходимо обеспечивать сброс информации на эти станции, как минимум, до тех пор, пока поток информации не будет синхронизирован.

Технология может быть создана при условии применения дублированной линии, подразумевающей наличие двух трансиверов на борту геостационарного космического аппарата. Подобная аппаратура может быть скомпонована как в виде двух независимых терминалов, так и в виде единого телескопа с расширенными возможностями фокальной плоскости для мультиплексирования двух станций. Кроме того, для успешной реализации технологии безразрывной

передачи данных, необходимо иметь сведения о реальной и прогнозной доступности земных станций с учетом всех факторов (облачности, турбулентности и пр.).

6.1.3. Барьеры развития — научные и технологические

Использование оптических линий связи для передачи информации с космических аппаратов имеет ряд принципиальных преимуществ перед традиционными радиотехническими технологиями. Это большие скорости передачи информации и меньшие размеры апертур приемо-передающих комплексов — факторы, в целом повышающие эффективность подобных решений. Однако существует серьезное фундаментальное ограничение, которое уже упоминалось: облачность существенно рассеивает оптическое излучение и при организации оптической фидерной линии этот фактор необходимо учитывать.

Как уже обсуждалось, в Европейском союзе предполагают серьезно нивелировать влияние облаков за счет создания распределенной сети станций, что позволит в перспективе приблизится к 100% возможности сброса информации с космического аппарата на земную станцию по оптическому каналу. В открытом космическом пространстве такой проблемы нет; соответственно, альтернативный подход к передаче информации предполагает, что информация с низкоорбитального космического аппарата может транслироваться по оптическому каналу на геостационарный спутник, который будет передавать информацию на земную станцию уже в радиодиапазоне, где нет проблемы прохождения сигнала связи через атмосферу.

С этой точки зрения возникает несколько технических проблем, которые необходимо решать для повышения эффективности использования оптических каналов.

Для низкоорбитального космического аппарата на орбите 600 км антенная система должна обеспечивать покрытие ±115° в полусфере по направлению к геостационарному космическому аппарату. В свою очередь геостационарный аппарат должен иметь сектор обзора ±9° по направлению на низкоорбитальный. Кроме того, с учетом угла расхождения

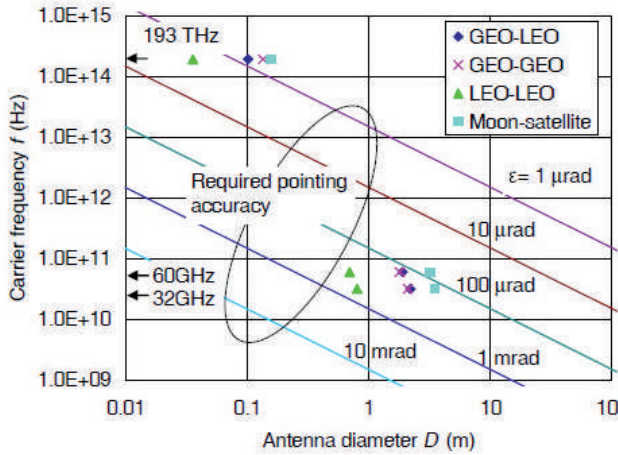
излучения необходимо обеспечивать высокие точности при наведении антенных систем. Например, антенна Ка-диапазона космического аппарата DRTS имеет точность наведения 0.1° и 0.0043° в режимах программного наведения и автономного отслеживания, соответственно. В случае использования более высоких частот излучения сигнала (например, миллиметрового диапазона) необходимы еще более высокие точности наведения антенных систем. Расхождение луча в этом диапазоне составляет всего 0.16°. Следовательно, даже для антенн радиодиапазона уже нужна специальная система наведения или отслеживания местоположения абонента — «трекинга» [6.29].

Для оптической системы связи с учетом угла расхождения луча равного 19.3 мкрад требуются существенно более точные системы. Вследствие невысокого расхождения луча оптические системы всегда будут требовать автоматических систем наведения. Кроме того, возникнут дополнительные требования по стабильности платформы космического аппарата на целевой орбите.

На Рисунке 6.1 представлена зависимость суммарной точности наведения антенны как функции диаметра и несущей частоты сигнала. Из рисунка следует, что радиотехническим системам с антеннами диаметром несколько метров требуется точности наведения порядка 100 мкрад (0.006°). Оптические системы с антеннами диаметром несколько сантиметров придется контролировать с точностью наведения 1 мкрад (0.00006°). При таких условиях, из-за узкого оптического луча любая вибрация элементов платформы космического аппарата будет приводить к повышению числа ошибок при передаче информации в телекоммуникационном канале [6.30].

В качестве одного из решений указанной проблемы предлагается рассматривать адаптивную систему изменения мощности излучаемого сигнала [6.31] и искусственно расширенный луч оптической линии [6.32]. Оптимальное соотношение между шириной луча и уровнем вибраций исследуется в [6.33].

Другим важным ограничительным фактором, даже при работе в окнах прозрачности атмосферы, является атмосферная турбулентность. Случайная атмосферная турбулентность ведет к искажению волнового фронта и мерцаниям



По оси абсцисс — диаметр антенной системы, по оси ординат — частота несущей сигнала.

Рисунок 6.1 — Требуемая точность наведения антенной системы.

Источник: [6.9]

сигнала [6.21]. При организации канала связи с космическим аппаратом турбулентность приводит к пространственному рассеянию энергии луча, что приводит к сильному затуханию сигнала. В канале передачи информации по направлению к Земле, воздействие турбулентности абсолютно аналогично.

Технологии, предлагаемые для смягчения последствий атмосферной турбулентности для каналов «вниз» и «вверх», в принципе, аналогичны. Применяется технология распределенного источника сигнала, предполагающая размещение излучателей на расстоянии, существенно превышающем атмосферную трансверсальную когерентную длину (параметр Фрида). Для оптических систем эта длина не превышает 0.5 м. Несколько лучей несут одинаковую информацию, но испытывают различные искажения вследствие различного объема турбулентности на разных оптических путях, которые они проходят в атмосфере. В такой конфигурации MISO (multiple-input single-output) пространственно распределенные источники суммируются на приемнике, тем самым

уменьшая вероятность затухания сигнала [6.34]. Кроме того, подобная схема излучения дополнительно увеличивает мощность принимаемого приемником сигнала. Однако накладываются и дополнительные ограничения. Многолучевые передатчики должны быть взаимно некогерентны для того, чтобы избежать межлучевой интерференции на спутниковом приемнике. Такая взаимная некогерентность требует, как минимум, дополнительных ресурсов в виде расширенной оптической полосы спектра.

На линии «вниз» адаптивная оптика корректирует искаженный волновой фронт сигнала таким образом, чтобы он мог быть сфокусирован в одномодовое волокно с хорошей эффективностью [6.35]. Большая апертура приемной антенны позволяет применить пространственное усреднение для уменьшения мерцаний сигнала [6.36].

Еще одной технической проблемой является создание «прозрачного» интерфейса на космическом аппарате при необходимости преобразования сигнала оптического диапазона в радио и наоборот.

Высокоскоростные линии связи, построенные на оптоволокне, базируются на принципах модуляции сигналов. Если такая схема передачи (например, DPSK) будет применена к оптической линии связи геостационарного космического аппарата, бортовой аппаратуре необходимо иметь возможность конвертирования оптической модуляции в радиотехническую (например, DBV-S2) и т. д. Для этого необходимо заранее знать какой тип модуляции сигнала используется в земных терминалах и, следовательно, аппаратура космического аппарата будет заведомо не универсальной.

В том случае, когда «прозрачность» космического аппарата является принципиальным требованием потребителя, полезная нагрузка должна принимать и перенаправлять любой тип пользовательского сигнала. На практике аппаратура космического аппарата, как правило, «прозрачна» к типу модуляции и скорости передачи пользовательского сигнала в пределах заданной полосы. Другими словами, это означает, что пользовательская информация не может быть декодирована бортовой аппаратурой. Требования прозрачности космического аппарата непосредственно влияют на дизайн и принципы функционирования оптической линии,

поскольку в этом случае радиотехнические сигналы должны восприниматься как аналоговые. Для решения этой проблемы предлагается несколько решений.

«Прозрачность» достигается путем реализации аналоговой оптической линии. В этом случае предлагается использовать технологию «Радио над FSO» [6.37–6.39]. Поскольку аналоговые приемники не могут реализовать декодирование сигнала в каждом канале, в котором ведется прием, атмосферные возмущения должны устраняться на физическом уровне.

Цифровая оптическая линия может обеспечивать некоторую «прозрачность», если сигнал радио диапазона оцифрован с достаточно высокой частотой дискретизации. Однако свойство «прозрачности», в этом случае, достигается за счет нерационального использования ресурсов оптической линии (мощности и полосы пропускания), по отношению к возможностям традиционной линии радиодиапазона.

Наконец, одним из вариантов повышения эффективности при использовании вышеуказанного способа, является заблаговременное разложение радиосигнала на составляющие (FDM и I-Q компоненты) с последующей отдельной оцифровкой каждого компонента. Подобная операция позволит осуществить оптическое мультиплексирование каналов и значительно снизить необходимую мощность и полосу излучения [6.21].

Таким образом, в том случае, когда известно с каким типом модуляции необходимо работать потенциальной системе, можно использовать различные решения, преобразующие радиотехнический сигнал в оптический или наоборот. Однако, если необходимо создать универсальный инструмент, полностью «прозрачный» к циркулирующей информации, при текущем уровне развития технологий, при всех преимуществах оптических линий их использование может оказаться экономически нецелесообразным.

6.1.4. На каком временно́м горизонте можно ожидать коммерциализации новых технологий

В ближайшей перспективе (до 2020 года) можно не ожидать внедрения в России космических систем оптической передачи информации. Связано это в первую очередь с отсутствием необходимой, как наземной, так и бортовой аппаратуры, достигшей необходимого для внедрения уровня технологической готовности. Кроме того, с учетом недавно введенной в эксплуатацию телекоммуникационной системы «Луч», при разработке систем ретрансляции информации с борта низкоорбитальных космических аппаратов будут в первую очередь ориентироваться на эту систему.

В Европе и США внедрение систем оптической передачи информации фактически уже произошло. С учетом запуска в 2013 году КА «AlphaSat» и планируемого запуска до 2017 г. космических аппаратов «ERDS-A» и «ERDS-C» [6.40] будет полностью развернута европейская система ретрансляции информации (ERDS). Система предназначена в том числе для сбора информации с низкоорбитальных космических аппаратов в оптическом диапазоне с последующей ее ретрансляцией на земную станцию в Ка-диапазоне спектра.

Примерно к 2030 году можно ожидать внедрение технологий ретрансляции информации в оптическом диапазоне на самолеты и беспилотные летательные аппараты. Причем в первом случае речь идет об исключительно коммерческой технологии, которая обеспечит фактически безлимитный доступ к всемирной сети Интернет для пассажиров авиалайнеров. Однако для внедрения указанных технологий требуется разработать ряд принципиально новых решений, связанных с технологиями мультиплексирования и оптических фазированных решеток.

6.1.5. Оценки текущего и потенциального спроса (масштабы рынков)

Рынок приборостроения в интересах космической отрасли, в принципе, достаточно узок. Общемировая орбитальная группировка космических аппаратов составляет сегодня около 1000 реально эксплуатируемых объектов на орбите Земли

[6.41]. Страны-лидеры космической индустрии запускают до 30 космических аппаратов в год.

С учетом высокой стоимости космических аппаратов происходит постоянное увеличение сроков активного существования в интересах повышения эффективности космических проектов. Естественно, эта тенденция также не ведет к увеличению производства космической техники.

Тем не менее, с учетом преимуществ, которые предоставляют технологии оптической передачи информации (высокая скорость, меньшие размеры, масса и энергопотребление терминалов), а также с учетом внедрения систем ретрансляции данных, в которых присутствует оптический канал связи, все больше перспективных низкоорбитальных космических аппаратов будут оснащены оптическими терминалами.

Таким образом, можно констатировать, что объем общемирового производства терминалов оптической связи космического базирования по самой оптимистичной оценке не превысит 50–100 штук в год. Земных станций будет требоваться на порядок меньше, не более 2–3 штук в год с учетом вероятных темпов модернизации аппаратуры с учетом появления новых технологий.

6.2. Технологии фотоники для спутниковой навигации

6.2.1. Введение

Современные космические системы и комплексы активно используют методы и средства измерений временны́х и частотных характеристик регистрируемых сигналов. В работе [6.42] отмечается, что поскольку время и частота являются наиболее точно измеряемыми физическими величинами, то одним из основных приложений современной метрологии, обеспечивающих надлежащее функционирование спутниковой аппаратуры, является создание эталонов различных физических величин на основе применения фундаментальных физических констант (ФФК) и прецизионных измерений частоты.

Существенное влияние на точность определения местоположения наземных объектов по данным спутниковых навигационных систем оказывает относительная стабильность эталонов частоты, применяемых в составе бортовой аппаратуры космических аппаратов. Существующие сегодня средства с нестабильностью около 10^{-14} позволяют восстановить координаты объектов с метровой точностью. Переход к сантиметровой или миллиметровой точности требует использования бортовых эталонов времени с нестабильностью не хуже 10^{-16}. Такую точность позволят обеспечить оптические атомные стандарты частоты, разрабатываемые сегодня как за рубежом, так и в Российской Федерации.

В перспективных космических миссиях предполагается переход к технологии оптических атомным часов, что позволит распространить сегодняшние эксперименты по проверке фундаментальных физических законов на практические приложения в интересах различных потребителей [6.43].

В научной области бортовые оптические атомные часы обеспечат значительные преимущества в расширении нашего сегодняшнего понимания развития Вселенной. Оптические часы могут быть использованы для проверки принципа относительности Эйнштейна за счет беспрецедентно точных измерений гравитационного красного смещения [6.44], а также для четкого разделения различных теорий гравита-

ции путем измерения временной задержки Шапиро при передаче высокостабильных оптических сигналов на и от КА. Указанные цели потенциальных космических миссий могут в перспективе привести к значимому научному открытию: критике общей теории относительности Эйнштейна или наблюдению вариаций ФФК, что даст первое экспериментальное подтверждение нарождающихся теорий, нацеленных на унификацию теории гравитации и квантовой механики. Одно из возможных приложений — обнаружение гравитационных волн [6.45]

В области дистанционного зондирования Земли использование оптических атомных часов открывает новые возможности в геодезии [6.46, 6.47] и исследовании характеристик атмосферы.

Чувствительность высокостабильных и точных оптических эталонов времени определяет их возможное использование для прямых измерений геопотенциала Земли («квантовый компас») на уровне точности в нескольких сантиметров и с очень высоким пространственным разрешением. Такие наблюдения имеют очень широкий спектр приложений, включающих инженерию и строительство, добычу газа и нефти, картографию и глобальную навигацию [6.48]. Долговременные ряды наблюдений изменчивости локального гравитационного потенциала позволят прогнозировать сезонные и долговременные тренды масс ледовых шапок на полюсах Земли, океанские течения и изменчивость глобального водозапаса океанов. Международный комитет по изменению климата заинтересован в подобных данных, поскольку они обеспечивают важный вклад в модели прогноза изменений климата.

Одним из важнейших направлений развития фотонных технологий применительно к спутниковой навигации является разработка методов и средств генерации прецизионных и стабильных временных сигналов как на борту навигационных космических аппаратов, так и в составе наземных средств метрологического обеспечения оптических и квантовых генераторов.

В решении шестой Всероссийской конференции «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2015) [6.49] отмечается,

что для уточнения общеземной геоцентрической системы координат до миллиметрового уровня точности, для обеспечения погрешности синхронизации космических стандартов частоты и времени на уровне 10^{-15} и менее, а также с учетом требований международной программы глобальной системы наблюдения в геодезии (The Global Geodetic Observing System — GGOS), необходимо развивать исследования релятивистских явлений в наземных и бортовых высокоточных стандартах частоты и времени, на трассе распространения электромагнитных волн в высокоточных радиотехнических и оптических измерительных средствах.

Прецизионная метрология чрезвычайно важна для обеспечения прогресса в следующих приложениях [6.50]:

- фундаментальные исследования, использующие прецизионные измерения;
- связь, включая космическую, использующая высокую скорость передачи данных на большие расстояния;
- глобальные спутниковые навигационные системы ГЛОНАСС/GPS, применяющие точные измерения времени.

Потребительские приборы спутниковой навигации стали производится на коммерческой основе начиная с 1998 г. Сегодня они устанавливаются практически в каждый мобильный телефон. Достижения микроэлектроники позволили обеспечить совмещение телекоммуникационных возможностей с оптическими стандартами, которое всего десять лет назад могли себе позволить лишь несколько лабораторий в мире. Сегодня такие возможности уже обеспечиваются на коммерческой основе. В соответствии с исследованием NRC 1998 года миниатюрные атомные часы на кристалле изначально разрабатывались для обеспечения прецизионных локальных измерений. Появление на рынке квантовых каскадных лазеров расширило диапазон применений лазерных источников на кристалле для целей дистанционного зондирования в среднем инфракрасном диапазоне (3–30 мкм). Датчики терагерцового диапазона нашли применение для обеспечения безопасности в аэропортах и таможенного контроля товаров, перевозимых через границы независимых государств.

Быстрое развитие измерительной техники, основанное на использовании квантовых физических явлений, позволяет

добиться высочайших точностей определения многих ФФК. Так, например, уровень относительных стандартных неопределенностей реализации частот переходов между состояниями с фиксированной энергией атомов цезия и ионов ртути достигает 10^{-16}. Для повышения точности и стабильности измерений необходимо переходить к квантовым эталонам. Такой переход является основным направлением совершенствования эталонной базы метрологических организаций многих стран. Разработка, внедрение и применение квантовых стандартов единиц физических величин наивысшей точности базируется на использовании значений ФФК — таких, как скорость света c, постоянная Планка h, постоянная Больцмана k, массы и заряды элементарных частиц — электрона, протона и т. д.

Перспективные средства измерений на основе фотонных технологий оказывают все более сильное влияние на нашу повседневную жизнь. Уже невозможно представить использование транспортных средств без определения их местоположения в напряженном трафике городских дорожных сетей. Следует отметить, что сроки проникновения данной технологии на потребительский рынок были весьма ограничены, поскольку с конца 1990 годов. навигационные приемники только появились на рынке. Сегодня возможности позиционирования различного назначения можно увидеть и в сотовых телефонных аппаратах, и в автомобильных навигационных терминалах и даже в идентификационных метках, устанавливаемых на домашних животных. Метод спутниковой навигации основан на точном измерении времени прохождения сигнала от спутника до потребительского терминала, обеспечивая таким образом высокую точность позиционирования объекта, наряду с высокой скоростью передачи данных и обеспечением телекоммуникационных возможностей на значительных расстояниях [6.51]. Необходимая точность измерения времени в современной аппаратуре спутниковой навигации обеспечивается современными достижениями фотонных технологий, например, за счет использования компактных атомных часов на кристалле [6.52].

Отметим, что атомные часы — устройство для точного измерения времени, основной частью которого является квантовый стандарт частоты. Эталон атомного времени не

имеет суточных и вековых колебаний, не стареет и обладает достаточной определенностью, точностью и воспроизводимостью. Для обеспечения работоспособности атомных часов используется три типа устройств — резонатор, осциллятор и генератор.

Резонатор — прибор, выполняющий роль высокостабильного частотного дискриминатора. Когда на него направлены пучки атомов или молекул, в нем возникает электромагнитное поле под действием задающего кварцевого генератора, а затем и взаимодействие этого поля с осциллятором — пучком атомов. Компания «Новые энергетические технологии» предложила оригинальную схему квантового дискриминатора для атомных часов, не уступающего по своим характеристикам лучшим зарубежным аналогам [6.53]

Осциллятор — в современных атомных и молекулярных часах в качестве осциллятора служит атомный или молекулярный (квантовый) эталон частоты. Источник эталонной частоты у атомных цезиевых, рубидиевых, таллиевых часов имеет пассивный характер, так как ход их регулируется с помощью спектральной линии поглощения при резонансном переходе соответствующих пучков атома из одного квантового состояния в другое.

Источник другого типа эталонной частоты имеет активный характер. Он известен как квантовый генератор. Из них наиболее разработаны — водородный квантовый генератор на пучке атомарного водорода и молекулярный квантовый генератор на пучке молекул аммиака.

6.2.2. Основные направления исследований и их применений

В данном пункте рассмотрены основные требования к перспективным технологиям спутниковой навигации на основе применения фотонных технологий в трех упомянутых направлениях: новые естественные стандарты частоты, атомные стандарты частоты в метрологии координатно-временно́го обеспечения спутниковых навигационных систем и малогабаритные атомные часы.

В итоговом отчете Управления национальной космической безопасности США «Исследование Национальной

архитектуры средств координатно-временно́го и навигационного обеспечения» [6.54] представлены направления развития и рекомендации по оценке альтернатив развития систем КВНО США, в котором основное внимание уделено плану построения архитектуры КВНО США и её основного звена — системы GPS. Группа разработчиков, перед которой была поставлена задача определения потенциальных средств и технологий для обеспечения решения задач КВНО, использовала принятые в Управлении национальной космической безопасности процедуры, чтобы обеспечить охват нестандартных идей, которые в настоящее время могут казаться экстремальными или необычными, а в 2025 станут привычным делом. Так, например, прорывные технологии, Chip-Scale Atomic Clocks (CSAC) — малогабаритные атомные часы, высокоточные оптические часы, малозатратные блоки инерциальных датчиков Micro Electro-Mechanical Systems (MEMS) - микроэлектромеханические системы, чрезвычайно высокоточные интерферометрические инерциальные навигационные системы и пр., могут оказать значительное воздействие как на будущую архитектуру КВНО, так и на направления развития спутниковых навигационных систем.

В результате группа разработчиков определила 50 перспективных технологических решений КВНО, представленных в Таблице 6.1. Перечисленные технологии относятся к различным областям архитектурного пространства КВНО, при этом они могут быть эффективно использованы для определения направлений развития и критических технологий при исследовании подходов и принципов построения перспективных спутниковых навигационных систем.

Анализ технологических направлений, представленных в Таблице 6.1, позволяет выделить приоритетные направления развития глобальных навигационных систем и обозначить основные принципы построения перспективной системы ГЛОНАСС. В частности, к числу указанных направлений следует отнести следующие:

- использование малогабаритных атомных часов;
- использование оптических часов на основе атомных переходов на оптических частотах,
- установка лазерных ретрорефлекторов на все КА и использование наземных средств лазерного слежения

Таблица 6.1 — 50 перспективных технологических решений КВНО

№	Технологическое решение	Описание
1	*GPS/Galileo*	Широкое гражданское и военное использование совмещённых приёмников GPS/Galileo, причём военные используют GPS в качестве «золотого стандарта» для обеспечения безопасности, и все потребители используют алгоритмы обнаружения/устранения неисправностей, действующие благодаря наличию дополнительных спутников в зоне видимости.
2	*GPS/INS (Inertial Navigation Systems)/часы*	Широкое использование INS и часов для полуавтономных операций, инициализация всякий раз при доступных сигналах GPS, а также использование малогабаритных атомных часов.
3	*Системы резервирования средств КВНО*	Обеспечение дополнительных бортовых источников КВНО; Интерфейс Системы Навигационных Датчиков может быть изменён для обеспечения резервирования источников КВНО.
4	*Оптимальная спутниковая группировка к 2025 г.*	Оценка возможности использования геостационарной (GEO), средней околоземной (MEO) и низкой околоземной (LEO) орбит, а также их сочетаний для целей глобальных навигационных спутниковых систем
5	*Улучшение коммуникационного блока ОГ GPS*	Передача навигационного сообщения с геостационарных спутников и с беспроводных стрим-серверов по сети Internet.
6	*Мониторинг перебоев в работе GPS*	Создание пункта центрального управления, отображение в режиме реального времени через систему геопространственной информации данных о локальных и региональных перебоях в работе.
7	*Общая модернизация орбитальной группировки ОГ*	Установка лазерных ретрорефлекторов на все КА для повышения возможностей слежения и определения параметров орбит.

см. Продолжение Табл. 6.1 на с. 309

Продолжение Табл. 6.1.

1	2	3
8	*Система космического базирования с обеспечением резервирования и целостности*	Использование нескольких источников космического базирования (GPS, Galileo, SBAS) с наземной системой резервирования основных функций и совмещенным моделированием целостности.
9	*Интегрированная инерциальная навигация*	Интегрирование усовершенствованных INS в спутниковые навигационные системы.
10	*Система астроориентации*	Интегрирование усовершенствованных астронавигационных устройств в навигационные системы.
11	*Небесная система координат*	Определение положений небесных объектов с точностью, соизмеримой с точностью астронавигационных устройств [6.55].
12	*Оптические часы*	Использование атомных переходов на оптических частотах для обеспечения улучшенных частотно-временных измерений.
13	*Точная калибровка систем передачи точного времени*	Калибровка устройств, передающих сигналы точного времени, в режиме реального времени.
14	*Лазерные линии межспутниковой связи на ГНСС*	Связь элементов ГНСС через лазерные межспутниковые каналы передачи данных.
15	*Временно́е обеспечение спутников связи*	Встраивание функций передачи точного времени, включая атомные часы и соответствующее алгоритмы учёта влияния факторов окружающей среды и задержек распространения сигнала, в перспективные спутники связи.
16	*Передача сигналов времени через оптоволоконные каналы*	Формирование средств временно́го обеспечения, передающих временную информацию по оптоволоконному каналу связи.

см. Продолжение Табл. 6.1 на с. 310

Продолжение Табл. 6.1.

1	2	3
17	*Космическая навигация с использованием ГНСС*	Проектирование будущих ГНСС, способных обеспечивать космическую навигацию.
18	*Батиметрия*	Создание батиметрических баз данных для обеспечения более точной подводной навигации.
19	*Управление национальными средствами КВНО*	Разработка структуры государственных заказов для управления закупками при создании систем КВНО.
20	*Лунный направленный радиомаяк*	Создание излучателя навигационных сигналов по типу GPS-маяка на окололунной орбите.
21	*Лунный всенаправленный радиомаяк*	Размещение станций по типу GPS-псевдоспутников на поверхности Луны/Марса.
22	*Спутники связи и навигации Луны/Марса*	Спутники связи на орбите около Марса и Луны с полезной нагрузкой КВНО.
23	*Радионавигация с использованием амплитудно-модулированных (АМ) сигналов*	АМ-система в чистом виде работает как кинематическая дифференциальная система GPS.
24	*Формирование стереоизображений*	Слежение за фиксированными объектами при помощи двух камер, установленных по направлению движения, и двух камер, обращенных назад.

см. Продолжение Табл. 6.1 на с. 311

Продолжение Табл. 6.1.

1	2	3
25	*Система глобального позиционирования с функцией дополнительной поддержки (AGPS)*	Прогнозирует сигналы КА GPS, доплеровский сдвиг и чередование фаз псевдослучайных помех. Повышенная чувствительность достигается благодаря снятию модуляции информационных разрядов и повышению целостности, что позволяет улучшить характеристики на 3-4 дБ.
26	*AGPS с расширенными функциями (Global Locate)*	Возможности GPS интегрированы в сети сотовой связи, массивно-параллельные аппаратные корреляторы включаются в сетевую инфраструктуру, причём время задержки увеличивается на 30-40 дБ; AGPS использует данные, поступающие по выделенной линии радиосвязи.
27	*Система распределённого КВНО*	Интегрируются прогнозированные данные навигационных датчиков (GPS, INS, эхолоты, гирокомпасы, EM-log).
28	*Высокоорбитальные псевдоспутники ГНСС*	Стабильные, высокоорбитальные псевдоспутники ГНСС (высота ~21,000 м).
29	*Функциональное дополнение наземного базирования Дифференциальной ГНСС (DGNSS)*	Всемирная система функционального дополнения ГНСС по типу GDGPS, но обеспечивающая целостность для наземных потребителей. Этого можно добиться благодаря сочетанию существующих/проектируемых функциональных возможностей.
30	*Функциональное дополнение космического базирования Дифф. ГНСС*	Всемирная система функционального дополнения ГНСС по типу GDGPS/TASS, обеспечивающая целостность для наземных потребителей. Этого можно добиться благодаря сочетанию существующих/проектируемых функциональных возможностей.
31	*Единая DGNSS SBAS*	Единый сервис, обеспечивающий сантиметровую точность в режиме, близкому к реальному времени, постобработка для получения данных с миллиметровой точностью, а также данные целостности в реальном времени, передаваемые через локальные радиочастотные сети.

см. Продолжение Табл. 6.1 на с. 312

Продолжение Табл. 6.1.

1	2	3
32	*Наземная система РЧ передачи точного времени и временны́х интервалов (PTTI)*	Передача меток времени через наземную радиочастотную сеть с точностью 10 μсек (на данный момент точность составляет 100 μсек, с учётом поправки на задержку распространения сигнала) в глобальном и национальном масштабе с использованием станций WWVB с десятикратным увеличением точности и дополнительными антеннами.
33	*Алгоритм автономного контроля целостности RAIM*	Автономное обеспечение целостности благодаря использованию и мониторингу множества автономных доступных навигационных систем.
34	*Сетевое обнаружение и геопозиционирование помех*	Обнаружение помех ГНСС и SBAS в глобальном масштабе благодаря использованию системы оповещения и централизованного мониторинга НАП при поддержке систем связи.
35	*Национальные программы моделирования*	Разведывательные, оборонные, гражданские, отраслевые и научные решения, обеспечивающие моделирование средств координатно-временного, навигационного и ориентационного обеспечения.
36	*Государственная/ частная Сеть опорных станций DGNSS*	Государственная сеть DGNSS со стандартизированными протоколами доступа к данным и проверкой точности опорных станций. Государственное агентство предоставляет ключевую инфраструктуру, давая возможность частным компаниям участвовать в процессе создания стоимости.
37	*Государственная/ частная Сеть опорных станций RTN*	Государственная сеть RTN со стандартизированными протоколами доступа к данным и проверкой точности опорных станций. Государственное агентство предоставляет ключевые объекты инфраструктуры, для того чтобы обеспечить растущие требования к точности в густонаселённых районах, давая возможность частным компаниям участвовать в процессе создания стоимости.

см. Продолжение Табл. 6.1 на с. 313

Продолжение Табл. 6.1.

1	2	3
38	*ГНСС, использующая вспомогательную сетевую инфраструктуру*	Широкое использование ГНСС, дополненных коммуникационными сетями (например, сотовыми сетями). При доступности сигналов GPS для обеспечения передачи навигационной информации используется сотовый телефон (или военная связь). Когда доступа к сигналам GPS нет, используется сеть для предварительного решения задач КВНО. Сети также могут обеспечить дополнительные LBS-услуги.
39	*Относительная навигация*	Потребители получают информацию КВНО благодаря навигации относительно других потребителей. Относительная навигация, привязанная к инерциальной системе отсчёта через пользователей GPS и астродатчики, позволяет получить высокую точность, круглосуточно использовать звездные датчики и обновлять звёздный каталог (программа J-MAPS).
40	*GPS/LORAN*	Широкое использование совмещенных приемников, работающих на основе GPS/LORAN, в условиях, когда требуется надежное КВНО. Предлагается разместить готовую систему eLORAN, в особенности на Аляске, и оказывать содействие разработке (относительно) малогабаритных, низкозатратных, совмещенных приемников, параллельно изучая возможности снижения затрат на эксплуатацию и техническое обслуживание инфраструктуры LORAN.
41	*Усовершенствованная НАП GPS*	Широкое использование усовершенствованной навигационной аппаратуры потребителей с помехоустойчивыми антеннами и электроникой, различной конструкции и в широком диапазоне цен, а также высокой чувствительностью и расширенными функциональными возможностями вне помещений.
42	*Улучшенная функция обнаружения помех*	Сравнительно простые средства обнаружения помех, заложенные во всех станциях мониторинга системы GPS и функциональных дополнений.

см. Окончание Табл. 6.1 на с. 312

Окончание Табл. 6.1.

1	2	3
43	*Данные целостности от WAAS на GPS III*	Станции мониторинга WAAS предоставляют сообщения целостности GPS для передачи через КА GPS III, вместо существующего космического сегмента WAAS. Высокая мощность каналов связи GPS III обеспечивает своевременность передачи данных. Возможно также использовать другие станции мониторинга, расположенные по всему миру (Galileo, QZSS, ГЛОНАСС и т. д.) при необходимсти проверки достоверности данных.
44	*ИНС, использующая трёхмерные изображения*	Потребители с умеренными требованиями к точности и высокими требованиями к устойчивости используют интегрированные решения на основе данных MEMS, INS, CSAC, шагомеров, одометров и трехмерных изображений. См. презентацию с Дней Промышленности Исследовательской Лаборатории ВВС США (AFRL).
45	*Использование всех доступных сигналов*	НАП, принимающая и использующая все доступные сигналы (SOO) для обеспечения навигационного решения в отсутствие специальной передающей антенны
46	*Универсальная система КВНО*	Интегрированный приемник с использованием данных INS, ГНСС, часов, астронавигации и всех доступных сигналов.
47	*Средства персонального КВНО*	Портативный (напр., размером с наручные часы) интегрированный приемник с использованием систем INS, ГНСС, CSAC, SOO, применяющих технологии MEMS или нанотехнологии.
48	*Интегрированные средства связи и ГНСС*	Система, использующая как системы связи, так и ГНСС в целях обеспечения устойчивого решения задач КВНО.
49	*Гравиметрическая навигация*	Использование средств высокоточного картографирования и восприятия гравитационного поля Земли.
50	*Система спутникового лазерного слежения*	Использование спутниковых лазерных ретроотражателей и наземных средств лазерного слежения в целях улучшения моделей спутниковых орбит, в том числе для системы GPS.

в целях улучшения моделей спутниковых орбит для повышения точности определения параметров орбит;
- точная калибровка устройств, передающих сигналы времени, в том числе и бортовой аппаратуры КА, передающей информацию о времени в навигационном сигнале;
- связь элементов ГНСС через лазерные межспутниковые каналы передачи данных;
- обеспечение дополнительных бортовых источников КВНО;
- формирование средств временного обеспечения, передающих временную информацию по оптоволоконному каналу связи;
- создание единого сервиса ГНСС, который мог бы обеспечить сантиметровую точность в режиме, близком к реальному времени, и миллиметровую точность в режиме постобработки, а также данные целостности в реальном времени;
- организация высокоточного ЭВО потребителей, использующих все доступные сигналы для обеспечения навигационного решения.

Влияние на точность взаимной синхронизации КА спутниковых навигационных систем оказывают три основных фактора:
- точностные характеристики системной шкалы времени, которые определяются технологией ее реализации — стабильностью составляющих ее хранителей времени, методами их сличения и построения групповой шкалы времени;
- точностные характеристики синхронизации бортовых шкал времени (БШВ) и системной шкалы времени, определяемые технологией процесса синхронизации;
- точность прогнозирования в аппаратуре потребителя бортовых шкал времени на заданный интервал, которая определяется стабильностью установленного на борту КА БСУ на основе бортовых стандартов частоты с определенными точностными характеристиками.

Использование излучения пульсаров для синхронизации спутниковых навигационных систем

Одним из возможных направлений развития временной синхронизации спутниковых навигационных систем в перспективе может быть ее построение на основе пульсарных шкал времени, развиваемых в последнее время как за рубежом, так и у нас в стране [6.56, 6.57]. Подробный обзор различных методов навигации в дальнем космосе приведен в работе [6.58].

Идея использования высокостабильной повторяемости наблюдаемого импульсного пульсарного излучения на практически неограниченной пространственно-временной протяженности путем трансформации его в эталонную шкалу времени возникла практически сразу после открытия пульсаров в 1967 г. Относительная нестабильность собственного вращения ряда пульсаров составляет величину 10^{-14} и выше на временном интервале в несколько лет. Наилучшее значение демонстрирует пульсар J0437-4715, для которого нестабильность $\sigma_y(\tau) \leqslant 10^{-15}$ на временно́м интервале, большем 3 лет (непрогнозируемый уход — 10 нс за три года). Таким образом, уровень стабильности пульсарной шкалы времени (ПШВ) потенциально высок и принципиально позволяет использовать ее в интересах формирования высокостабильного и высокоточного эталона времени.

Шкалы, основанные на пульсарах, обладают несколькими преимуществами по сравнению с уже существующими атомными шкалами времени:

- возможностью надежного наблюдения источника имеющимися или перспективными астрономическими инструментами с требуемой точностью решения задач потенциальным потребителем;
- длительностью времени жизни источника, обеспечивающей требования потребителя (зависит от поставленной задачи);
- высокой точностью описания (экстраполяции) аналитической моделью моментов прихода импульсов излучения (высокая стабильность наблюдаемого периода излучения, или прогнозируемость);

- меньшей величиной периода излучений, чем требуемый период синхронизации шкалы времени потребителя;
- высокой степенью распознаваемости вариаций ЭМИ.

Проведенные, в том числе и в России, исследования показали, что благодаря наличию достаточно большого количества ярких стабильных пульсаров, существует возможность построения на основе их наблюдений групповой шкалы пульсарного времени, обладающей более высокой стабильностью, чем стабильность каждого из входящих в нее отдельных пульсаров. Стабильность групповой пульсарной шкалы времени оценивается величиной порядка 10^{-16} на длительных интервалах времени (годы, десятилетия), что, вообще говоря, стабильнее существующих атомных групповых шкал времени.

В этой связи представляет значительный интерес будущая конкурентоспособность пульсарной шкалы времени (ПШВ) в сравнении с атомными шкалами времени. Вопрос очень важен в связи с тем, что развитие наземных атомных стандартов частоты идет быстрыми темпами, и за полвека их стабильность улучшалась в среднем на порядок за каждые 7 лет. Сейчас их характеристики уже сравнимы со стабильностью самых высокостабильных пульсаров. Например, самые массовые цезиевые часы, используемые для формирования всемирной шкалы времени TAI, типа 5071A, имеют нестабильность частоты на интервалах выборки 3–5 суток $\sigma_y(\tau) \leqslant 5\times10^{-15}$. Что же касается часов на основе лучших водородных мазеров, то их нестабильность на временах выборок 5 суток составляет $\sigma_y(\tau) \leqslant 5\times10^{-16}$. Групповые шкалы времени (TAI, UTC) еще более точны: по данным результатов от 220 атомных часов из почти 50 лабораторий времени по всему миру эти шкалы имеют нестабильность около 2×10^{-15} на интервале нескольких недель и сохраняют тенденцию к дальнейшему ее снижению.

Кроме этого, необходимо оценить возможные характеристики системы синхронизации бортовых эталонов времени спутниковых навигационных систем на основе ПШВ и возможность создания технологий, связанных с непосредственным использованием потребителями ПШВ технологии оперативного приема и обработки чрезвычайно слабых сигналов пульсаров, обеспечивающих наносекундную точность синхронизации потребителя.

Космические бортовые оптические эталоны времени

Бортовые оптические атомные часы найдут широкое применение в перспективных глобальных спутниковых системах различного целевого назначения. Предлагается использовать такие часы как в наземном, так и в бортовом сегментах спутниковой навигационной системы, что улучшит на два-три порядка точность бортовых эталонов времени. Это, в свою очередь, снижает необходимость обновления параметров бортового эталона времени и соответственно повышает автономность КА. По мере прогресса в понимании влияния атмосферы на прохождение навигационного сигнала это приведет в конечном итоге к существенному повышению точности определения местоположения для потребителей системы.

В конечном итоге бортовые оптические эталоны времени найдут широкое применение во многих областях. Подробный обзор применения европейских разработок в области спутниковой навигации представлен в работе [6.59].

В уже упоминавшейся работе по атомным оптическим эталонам времени даются рекомендации по параллельной разработке четырех различных вариантов оптических атомных часов [6.60]:

- оптические атомные часы с ионными ловушками на основе 88Sr+ [6.61];
- оптические атомные часы на основе решетки атома стронция [6.62];
- оптические атомные часы с ионными ловушками на основе квантовой логики, использующие 27Al+;
- оптические атомные часы на основе пространственной решетки атома ртути.

Рассмотренный подход по параллельной разработке обусловлен необходимостью достижения рекордных характеристик, которые нужно продемонстрировать уже на этапе прототипирования, обеспечивая в тоже время выполнение конструкторских разработок, интегрирующих бортовые эталоны времени в аппаратуру КА. В результате будет реализовано несколько вариантов часов, каждый из которых имеет собственные достоинства в компактности, стабильности или

точности и которые могут быть отобраны для использования в любой конкретной миссии с высокой степенью уверенности и минимальным технологическим риском.

Следует отметить, что некоторые элементы унифицированы для всех четырех вариантов, например, источник спектра частот излучения, а также многие элементы локального оптического задающего генератора. Разработка указанных устройств предполагается в широкой международной кооперации компаний из стран Европейского союза, включающих Великобританию, Германию, Францию, Австрию, Италию и Швейцарии, имеющих лидирующие позиции в метрологии оптического излучения. Безусловно, такая работа должна с самого раннего этапа проходить при консультировании специалистами компаний — космических системных интеграторов. Рекомендовано, чтобы одна из таких космических компаний затем выполняла роль головной организации на следующем этапе разработки.

Малогабаритные атомные часы

Исследования по созданию малогабаритных оптических стандартов частоты лежат в русле миниатюризации используемых для этих целей лазеров. Одними из первых подобные работы были начаты в Национальном институте науки и технологий (Болдер, США) [6.63]. Аналогичные проекты ведутся, в частности, в Институте лазерной физики СО РАН [6.64]. Размер разработанного здесь лазера составляет 20 на 30 см. На его основе создан оптический стандарт частоты (ILP I2/532-1). Стандарт имеет выход излучения на 532 нм (или/и на 1064 нм). Оптический стандарт предназначен для использования в баллистическом гравиметре. Параметры стабильности и воспроизводимости частоты лучше, чем 10^{-10}. Другой прибор лаборатории — оптический стандарт частоты (ILPI2/532-3L).

Недавно совместным усилиям ФИАН, Научного центра волоконной оптики и «Авеста» (фирма, организованная внутри ОКРФ ФИАН) впервые были реализованы компактные фемтосекундные оптические часы, способные после необходимой технической доводки работать на борту искусственного спутника (стабильность — 10^{-14}).

На сегодняшний день работы в области оптических стандартов частоты находятся по большей части на стадии НИОКР, коммерческое использование подобных приборов ограничено. Можно полагать, что при условии преодоления свойственных им недостатков, подобное оборудование имеет весьма позитивные рыночные перспективы.

6.2.3. Барьеры развития — научные и технологические

Использование атомных часов, оптических эталонов и стандартов частоты в технике достаточно ограничено. В основном, подобные приборы используются при проведении исследований национальными службами времени и частоты, а также в наземных пунктах слежения и управления спутниковыми радионавигационными системами. Обусловлено это целым рядом причин, среди которых основными являются:

- неразвитость в России производственного направления по изготовлению оборудования на основе стандартов частоты (например, оборудование для синхронизации телекоммуникационных сетей); по большей части оно импортируется из-за рубежа и имеет в своем составе предустановленные стандарты частоты иностранного производства;
- подобные приборы имеют достаточно долгий срок службы (15 лет и выше), что сужает потребность в них в сегменте замены;
- современный уровень технологических разработок в области стандартов времени и частоты делает невозможным его применение во многих отраслях; например, большие габариты и высокое энергопотребление не позволяет использовать их в портативных потребительских приборах.

6.2.4. На каком временно́м горизонте можно ожидать коммерциализации новых технологий

Российская компания «Новые энергетические технологии» — резидент Сколково выполнила маркетинговые исследования возможностей использования малогабаритных атомных

часов в России. В итоговом отчете отмечается, что на сегодняшний день российский рынок стандартов частоты и времени занимает весьма незначительное место в глобальной структуре спроса на такие приборы. Основные рыночные показатели находятся в состоянии стагнации, а темпы роста, которыми характеризуется сегмент атомных часов, являются весьма сдержанными.

Спрос на стандарты частоты и времени формируется по большей части за счет государственного сегмента. Следовательно, увеличение финансирования науки и наукоемких производств (включая оборонные отрасли), а также объема государственного заказа, приводит к пропорциональному росту рынка стандартов частоты и времени.

Более активной коммерциализации могли бы также способствовать разработки по преодолению присущих современным атомным часам технологических недостатков. В частности, снижение их габаритов до приемлемых размеров (объем не более 1 $см^3$) и достижение оптимальных показателей энергетических затрат (около 3–5 Вт).

6.2.5. Оценки текущего и потенциального спроса (масштабы рынков)

Анализ современного состояния и динамики российского рынка квантовых стандартов частоты и времени позволяет определить прогнозные характеристики потребления таких приборов как весьма сдержанные. Оптимистичный прогноз предполагает сохранение актуальной динамики рынка и динамику потребления с актуальными темпами роста 8.91% (CAGR в 2008–2011 годах). При таких показателях объем рынка квантовых стандартов частоты в 2015 году достигнет 480 ед., а к 2020 году — 735 ед.

Сценарий развития рынка определяется перспективной динамикой двух сегментов потребления — стационарных и портативных приложений. Причем, если в первом случае ситуация во многом будет определяться эффективностью государственного стимулирования отраслей-потребителей (регулируемого сегмента ГЛОНАСС и ВПК), то во втором — основополагающее значение будет иметь инновационный потенциал российских

производителей и скорость достижения конкурентоспособности с товарами-заменителями.

Определяющей для развития рынка будет ситуация в сегменте стационарных приложений, поскольку именно здесь формируется основной объем актуального спроса на атомные часы. В числе возможных стимулов выступает активная государственная поддержка в области ГЛОНАСС и производства продукции военно-промышленного назначения, а также рост потребления базовых станций в России и мире. Именно быстрорастущий сегмент телекоммуникаций обладает наибольшими предпосылками к росту спроса на атомные часы. Однако все перечисленные выше рынки представляют весьма узкие области приложения атомных часов с ограниченной емкостью.

Ограничивает емкость рынка и специфика самого оборудования: специфичные и эксклюзивные области применения, высокий период наработки на отказ и др.

При современном уровне развития технологий в области производства атомных часов предпосылки к расширению спроса на них на потребительских рынках отсутствуют. Эксперты отмечают, что на сегодняшний день и в ближайшей перспективе подобные показатели стабильности востребованы в весьма узких отраслях. Очевидно, что потребители сегодня предпочтут громоздкому, энергоемкому и дорогому прибору с атомными часами, традиционную модель на основе кварцевых генераторов, пусть и с потерей частотных характеристик.

Между тем, позитивным моментом для атомных часов является объективная тенденция по постоянному ужесточению потребительских требований во многих областях. Поэтому вполне вероятно, что атомные часы в долгосрочной перспективе способны занять весьма устойчивые позиции на рынке. Однако темпы, с которыми они будут замещать традиционные приборы, зависят от целого ряда факторов.

Во многом перспективы применения атомных часов в портативных приборах определены темпами освоения их производства в промышленных масштабах, и в этом состоит основной побудительный мотив использования данной технологии в дорожной карте развития фотоники в Российской Федерации [6.65]. Рост объемов производства, в свою оче-

редь, мог бы способствовать достижению измерительными приборами конкурентной стоимости. В данном случае под пороговым значением конкурентной стоимости можно понимать средний уровень цен на прецизионные кварцевые генераторы, т. е. 100–150 долл./шт.

Основной профиль российского производителя — компания, осуществляющая разработку, производство и сервисное обслуживание приборов и оборудования для измерения времени и частоты.

Наиболее известными на мировом рынке коммерчески доступных малогабаритных оптических атомных часов являются изделия компании Symmetricom (США), которая предложила широкий спектр их применений [6.66]. Использование оптических атомных часов для ряда конкретных приложений предусматривается и в Национальной стратегии использования квантовых технологий Великобритании [6.67]. Появились публикации о работах по созданию миниатюрных атомных часов в Бразилии [6.68].

Основным преимуществом российских производителей является более низкая стоимость производимых приборов, а также длительный срок гарантии. По ряду позиций разница в стоимости доходит до 200%. Например, активный водородный стандарт частоты компании Symmetricom стоит не менее 250 тыс. долл., а аналогичное оборудование российского производства — около 120 тыс. долл. Стоит отметить, что крупнейшие российские производители на сегодняшний день определились с приоритетными для них рынками сбыта. Так, компания «Кварц» в основном работает на спецпотребителей: заказы, в том числе предприятий ОПК радиотехнического профиля, составляют 90% от всей выпускаемой продукции. Другие 10% идут на экспорт в различные страны — Китай, Японию и США.

Компания «Время-Ч» ориентирована по большей части на телекоммуникационный рынок и является единственной российской компанией, выпускающей сертифицированные первичные эталонные генераторы для данной отрасли.

Стандарты частоты и времени можно использовать как конечную потребительскую продукцию, так и создавать на их основе оборудование с более высокой добавленной стоимостью. Второе направление в России пока развито в гораздо меньшей степени.

6.2.6. Ключевые проекты по разработке фотонных технологий в компаниях

Российские потребители атомных часов представлены группой государственных и коммерческих организаций. На сегодняшний день в числе крупнейших российских потребителей стандартов времени и частоты в государственном секторе можно выделить Службу времени и частоты Росстандарта (ФГУП ВНИИФТРИ), Академию наук РФ и Министерство обороны РФ.

В последние годы привлечение финансирования исследований со стороны бизнеса использует и Минпром России при организации работ по Государственной программе Российской Федерации «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности» на 2012–2020 гг. [6.69].

7. Биомедицинские приложения фотоники

На протяжении последних нескольких десятилетий роль фотоники повышалась не только в информационных технологиях. Свет является источником энергии для всего живого и применение методов фотоники в биологии и медицине лавинообразно растет при решении различных прикладных задач химии, биологии и медицины. Ожидается, что новые «зеленые» технологии сбора и преобразования света для солнечных элементов, фотохимического катализа для выработки экологически чистого топлива, терморегуляции и управления теплообменом и другие получат в грядущем десятилетии бурное развитие. Миниатюрные интегрированные носители оптоэлектронных датчиков, соединенных с информационными сетями, способны совершить переворот в биологии и здравоохранении.

Рост доли населения старшего возраста и растущая потребность в качественном медицинском обслуживании являются главными причинами увеличения рынка биофотоники. Ранняя диагностика опасных заболеваний, таких как рак, делает биофотонику привлекательным инструментом, особенно для быстрорастущих экономик. Затраты на развитие биофотоники будут расти во всем мире, особенно в Азиатско-Тихоокеанском регионе (в основном, по-видимому, благодаря Китаю).

Развитие персонализированной медицины несомненно приведет не только к существенному повышению качества диагностики и лечения, но и сделает возможной реализацию концепции превентивной медицины. Это требует разработки и создания новых комплексных систем, включающих быструю и точную диагностику, практически непрерывный

мониторинг состояния организма на трех уровнях — клеточном, тканевом, системном, доставку биологически активных веществ и их дистанционное высвобождение.

Следуя указанной выше тенденции, данный обзор отражает современное состояние биомедицинских применений фотоники и состоит из двух частей, посвященных, соответственно, биомедицинским сенсорам/системам визуализации и системам адресной доставки лекарств, фототерапии и хирургии.

7.1. Биомедицинские сенсоры и системы визуализации высокого разрешения

7.1.1. Введение

В настоящее время усилия научных групп направлены на повышение чувствительности до уровня детектирования одиночных молекул и улучшение методов микроскопии до уровня пространственного разрешения, формально превышающего дифракционный предел.

Методы оптической спектроскопии, такие как инфракрасная (ИК) спектроскопия и спектроскопия комбинационного рассеяния (КР-спектроскопия, или рамановская спектроскопия), находят применение во множестве отраслей промышленности благодаря бесконтактности и малому времени измерения. Для них, однако, характерна относительно низкая чувствительность. Чтобы преодолеть это ограничение, используется метод гигантского комбинационного рассеяния (ГКР или SERS от английского surface-enhanced Raman scattering), позволяющий добиться многократного (вплоть до 1 миллиона раз в среднем по образцу) усиления слабого рамановского сигнала. Это радикально расширяет спектр возможных приложений.

В методе поверхностного плазмонного резонанса (ППР) используются коллективные моды электронов благородных металлов. При распространении световой волны определенной частоты вдоль границы металла и диэлектрика может возникать сильное взаимодействие с коллективными осцилляциями свободных электронов металла. Это взаимо-

действие приводит к значительному уменьшению интенсивности отраженной световой волны в очень узких диапазонах углов падения и частот. Эти диапазоны задают условие плазмонного резонанса и являются наиболее чувствительными к изменению показателя преломления в тончайшем слое на границе металла и диэлектрика. Именно эта сверхчувствительность ППР используется для измерения малых изменений показателя преломления, вызванных биохимическими реакциями. Биомедицинские сенсоры обладают селективностью благодаря взаимодействию лиганд-рецептор или реакции гибридизации ДНК. В литературе много внимания уделяется анализу сложных биологических растворов для разработки новых биологических маркеров болезней включая различные типы рака.

Микроскопией сверхвысокого разрешения (МСР) называют процесс получения пространственного разрешения изображений, превосходящего теоретический дифракционный предел Аббе, определяющий минимальный размер деталей, которые можно разглядеть в микроскоп. Он равен половине длине волны света в среде наблюдения. Дифракционный предел Рэлея задает минимальный угловой размер объекта, равный приблизительно отношению длины волны света к апертуре прибора. Выделяют два основных типа МСР, реальные и функциональные. В реальных МСР добиваются субдифракционного разрешения благодаря включению неоднородных (эванесцентных) волн в построение изображений. Это может достигаться либо с помощью сканирования специальными оптическими зондами, имеющими размеры меньше чем длина волны и регистрирующими сигнал очень близко к объекту (ближнепольные микроскопы), либо с помощью так называемых «суперлинз», изготовленных из метаматериалов. Функциональные МСР производят реконструкцию сигнала. Во многих случаях их применение очень эффективно.

7.1.2. Основные направления современных исследований и их практических применений

Среди направлений фотоники, наиболее тесно связанных с существующими или потенциальными биомедицинскими применениями, выделяется разработка сенсорных систем и методов визуализации Достижения последних десятилетий демонстрируют существенный прогресс в этих направлениях.

Микроскопия сверхвысокого разрешения позволила преодолеть дифракционный предел и достичь нанометрового разрешения [7.1, 7.2]. Детектор регистрирует след меток, соединенных с биологическим объектом. Высокое разрешение достигается либо за счет стимулированного излучения меток с использованием двух лазеров, либо благодаря регистрации сильно «разбавленных изображений,» где одна метка попадает в область разрешения объектива и заменяется «точкой» существенно меньшей чем позволяет разрешение объектива. Флуоресцентные метки излучают в «мерцающем» режиме, так что одновременно светят немногие из них. Многократная регистрация позволяет реконструировать изображение с разрешением до одиночных молекул.

Нобелевская премия по химии за 2014 год была получена двумя американскими и одним немецким учеными за разработку флуоресцентной микроскопии сверхвысокого разрешения. Суть одного из подходов можно пояснить следующим образом. Из-за дифракции вместо точечного изображения флуорофора получается размытое пятно. Однако, если в его окрестности данного флуорофора не находятся другие источники флуоресценции, дифракция не препятствует более точному определению координат. Если флуоресцентные молекулы можно обратимо переводить из флуоресцентного состояния A в темновое состояние B так, чтобы молекулы в состоянии A были окружены молекулами в состоянии B, координаты молекул в состоянии A можно определить достаточно точно. Изображение с субдифракционным разрешением можно реконструировать, последовательно регистрируя некоторый набор молекул в состоянии A и, запоминая при каждом считывании их координаты [7.3]. Один из способов определить точное положение флуорес-

цирующих молекул в некоторой точке — целенаправленно перевести флуорофоры вокруг этой точки в темновое состояние [7.4]. Данный подход реализован в группе методов RESOLFT (REversible Saturable OpticaL Fluorescence Transitions), объединяющей несколько сходных концепций [7.3]. Первая практически реализованная из них — это микроскопия STED (STimulated Emission Depletion, метод подавления спонтанного испускания), основанная на подавлении эмиссии флуорофоров, расположенных вне центра возбуждения. Когда флуорофор находится в возбужденном состоянии A и встречает фотон с энергией, соответствующей разнице энергий между возбужденным и основным состоянием B, он возвращается в основное состояние до того, как произойдет спонтанная флуоресценция. Для вынужденной эмиссии флуорофоры освещаются, кроме возбуждающего света, STED-лазером с особым пространственным распределением интенсивностей в виде «бублика» с нулевой интенсивностью в центре. В результате флуоресцируют только молекулы, расположенные близко к области с нулевой интенсивностью STED-лазера, что сужает размер функции рассеяния точки. Так последовательно происходит сканирование всего образца [7.4].

Конфокальная и нелинейная микроскопия [7.5–7.8] в сочетании с молекулярной спектроскопией [7.9–7.11] сделали возможным, среди прочего, формирование изображений живых организмов для молекулярно-генетических исследований заболеваний. Конфокальная лазерная сканирующая микроскопия позволяет улучшить разрешения в трех измерениях благодаря детектированию лучей точно из фокальной области (посторонние лучи блокируются диафрагмой, помещенной в месте изображения фокальной области). Улучшение разрешения достигается также в случае детектирования двухфотонного отклика возбуждающего излучения. В этом случае дифракционный предел ниже по сравнению с линейным изображением.

Разработка улучшенных методов спектроскопии [7.12–7.17] (спектроскопия поглощения, аутофлуоресцентная спектроскопия, спектроскопия рассеяния света, спектроскопия комбинационного рассеяния), позволяют уточнить химический и молекулярный состав клеток и тканей в естественных условиях.

Методы фототерапии [7.8–7.22], в которых лазеры применяются для разрушения очагов заболевания, дают возможность выборочно воздействовать на сосуды и опухоли за счет естественного поглощения или оптического возбуждения введенного в организм фототоксичного агента (например, в фотодинамической терапии). Недавно было показано, что маломощное излучение в ближней части ИК-диапазона снижает уровень запрограммированной гибели клеток (апоптоза), тем самым смягчая ущерб при гипоксии и травмах [7.23, 7.24].

Метод гигантского комбинационного рассеяния (SERS) заключается в эффекте усиления сигнала рассеяния вблизи металлических наночастиц, поддерживающих коллективные осцилляции электронов, называемые *плазмонами* или плазмонными модами. Возбуждение резонансных плазмонных мод локализует электромагнитное излучение на существенно меньших, чем длина волны света, масштабах, создавая локально большие поля. Значимость идеи локализации света проще всего объяснить, рассмотрев плазмонный резонатор с модовым объемом VM. Взаимодействие света с молекулами в этих нанорезонаторах значительно усиливает оптический отклик. Разумеется, интенсивность такого взаимодействия снижается за счет оптических потерь, которые сокращают время жизни фотона в полости. Для количественного описания времени жизни фотона используют показатель добротности резонатора Q. Эффективность многих оптических процессов находится в степенной зависимости от отношения Q/VM. Хотя для наноразмерных металлических резонаторов характерны умеренные значения Q (обычно между 10 и 1000), значения VM у них могут оказаться столь малыми, что по эффективности процессов эти полости заметно превосходят полости в диэлектриках, имеющие на несколько порядков более высокие значения Q. Малым размерам и низким значениям добротности у плазмонных структур сопутствует сверхвысокая скорость процессов (<100 фемтосекунд) и широкий диапазон оптического отклика [7.25].

Гибридные системы молекул, связанных с плазмонами, открывают путь к новым технологическим успехам — от экспериментов по ГКР-спектроскопии и флуоресценции, усиленной плазмонами, до новейших приложе-

ний в биомедицине,— чип-интегрированных волноводов и чип-интегрированного катализа. Исчерпывающий обзор приложений, использующих отдельные плазмонные наночастицы или группы частиц, представлен Халас и ее коллегами в Chemical Reviews [7.26]. Теория рамановской спектроскопии усиленной локализованными плазмонами и ее применения к проблеме детектирования отдельных молекул обсуждаются в книге лидеров в этой области [7.27]. Следует отметить, что многие практические приложения в области биомедицины напрямую используют сильно локализованные плазмоны и их свойства.

Чувствительность ППР зависит от физического метода и непрерывно улучшается в течение последних десятилетий [7.28, 7.29]. Впечатляющий прогресс в ППР-технологии в последние годы был достигнут благодаря ускоренному развитию моделей и протоколов поверхностной химии биологических молекул на поверхности тонких золотых пленок. В коммерческих системах обычно используют конфигурации Кретчмана полного внутреннего отражения (ПВО), где поляризованный свет падает на полусферическую призму с напыленным на плоской поверхности металлом. В результате этого поверхностный плазмон может быть возбужден при определенном угле падения и определенной длине волны лазера. Уровень интенсивности отраженного сигнала вследствие возбуждения ППР определяется путем механического сканирования угла падения. Изменение показателя преломления на границе металла напрямую зависит от адсорбции или присоединении искомой биомолекулы к металлической (обычно золотой) поверхности, предварительно модифицированной нужным молекулярным лигандом. Это изменение показателя преломления детектируется по сдвигу провала в отражении.

Высокоэффективные спектроскопические методы являются одним из быстро растущих направлений. Они делают возможным использование сверхчувствительного молекулярного обнаружения как в исследовательских целях, так и для широкого спектра практических приложений. В частности, ниже рассматривается один из самых многообещающих методов, основанный на гигантском комбинационном рассеянии.

7.1.3. Барьеры развития области и конкретных направлений — научные и технологические

Создание новых фотолюминесцентных наноматериалов для биоимиджинга является важной фундаментальной задачей с большим потенциалом применения в медицинской практике. Особую актуальность данные материалы приобрели в связи с развитием хирургических эндоскопических методов. В настоящее время отсутствуют флуоресцентные маркеры, оптимизированные для эндоскопических методов. Потому важной научной проблемой нескольких разделов современной биофизики, включая медицинскую биофизику, биофизику клеток и тканей и т.д, является более точная идентификация патологических (онкологических) тканей на фоне здоровой ткани. Для решения этой задачи в настоящее время используются последние достижения фотоники и существует целый ряд подходов:

- поиск новых эффективных объектов, повышающих контраст и обеспечивающих высокое качество изображений, включая нанофосфоры, способные к антистоксовой люминесценции, золотые флуоресцентные нанокластеры, наноалмазы, нанорубины, плазмонно-резонансные частицы;
- безметочные (labelfree) технологии, например, когерентная антистоксовская рамановская спектроскопия и микроскопия (CARS) и многофотонная микроскопия сверхвысокого разрешения;
- просветление биотканей.

Для реализации первого подхода необходимо провести отбор нанообъектов, безопасно взаимодействующих с клетками и с тканями, при сохранении одновременно их фотолюминесцентных свойств и возможности эффективной инкапсуляции биологически активных веществ. Действительно, несмотря на то, что флуоресцентные метки давно и успешно применяются в экспериментах с культурами клеток и даже тканей *in vitro*, существует целый ряд ограничений по использованию их *in vivo*, например, аутофлуоресценция и сильное рассеяние присущее биологическим тканям.

Основные трудности при решении задач визуализации *in vivo* специфичны для того похода, который был выбран

для их решения. Например, первый подход связан с необходимостью одновременного решения нескольких серьезных биофизических и биохимических задач:

- наличие вектора для адресной доставки с одновременной его защитой от ферментной биодеградации (необходимо отметить, что ферментная биодеградация вектора всегда сопровождается «корона-эффектом», который и определяет характер распределения наночастиц [7.30];
- сохранение флуоресцентной метки;
- возможность использования данного носителя для инкапсуляции биологически активных веществ.

Создание таких систем открывает новые перспективы для реализации концепции тераностики (направление современной медицины, которая совмещает диагностические и терапевтические функции в одном объекте).

Определение сечения рамановского рассеяния, сечения ГКР и коэффициентов усиления ГКР (SERS) — задача, сложная по самой своей природе, поскольку ее решение требует наличия количественной информации о числе зондируемых молекул, о собирательной способности используемых инструментов, о распределении мощности лазерного излучения на образцах, и т. п. [7.31]. Дальнейшие сложности при определении сечения ГКР и коэффициентов усиления возникают из-за низкой воспроизводимости SERS-подложек [7.32]. Даже на одной и той же подложке сигнал ГКР значительно меняется от точки к точке. Эти технические сложности ограничивают обычно возможности систематического анализа корреляций между структурой исследуемого вещества и его нормальным сечением комбинационного рассеяния, сечением ГКР и коэффициентом усиления ГКР. Заполнить этот пробел важно не только для того, чтобы глубже понять эффект Рамана и явление гигантского комбинационного рассеяния, но и для того, чтобы разработать аналитические и биоаналитические методы, основанные на этих явлениях [7.33–7.36]. В недавней работе группы Чжана было показано, что SERS-подложка, использующая наночастицы, приводит к изменению рамановского сигнала исследуемого вещества за счет двух конкурирующих механизмов — SERS-усиления и эффекта внутреннего фильтра для наночастиц, а не только за

счет SERS-усиления, как было принято считать раньше. Показано, что комбинация КР-спектроскопии с разрешением по времени и метода внутреннего стандарта с использованием растворителя довольно эффективно решает проблему количественного анализа. Описанные выше результаты прекрасно иллюстрируют тезис о том, что идея количественной КР-спектроскопии, усиленной наноплазмонными структурами, вполне работоспособна и в применении к любому классу задач по молекулярному обнаружению может быть доведена до количественных методов исследования, обладающих высокой чувствительностью и избирательностью.

В другом подходе к измерению малых изменений показателя преломления предлагается использовать нанорешетки вместо призмы Кретчмана для возбуждения ППР и не требуется измерения угловой зависимости [7.37, 7.38]. Нормально падающее излучение очень чувствительно к локальным изменениям показателя преломления в непосредственной близости от металлической поверхности нанорешетки. Было показано, что предельная чувствительность сенсора зависит от отношения сигнала к шуму и используемых оптоэлектронных компонентов и, в меньшей степени, от оптической схемы возбуждения ППР [7.37]. Пути преодоления существующих ограничений ППР-сенсоров связаны с развитием современных приемников с более высоким отношением сигнал/шум и скоростью передачи данных, а также путем разработки новых типов поверхностных плазмонов [7.29]. Очевидно, что чем уже резонанс оптического отклика, тем лучше чувствительность сенсора. Дифракция на периодических структурах металлических наночастиц позволяет манипулировать свойствами локализованных плазмонов. Как было показано в теоретических моделях и экспериментах, интерференция волн в таких периодических структурах может привести к значительному сужению плазмонного резонанса, что сопровождается существенным усилением локального поля по сравнению с изолированными металлическими или полупроводниковыми нанокристаллами [7.38].

7.1.4. Временны́е горизонты и направления, на которых можно ожидать применения и коммерциализации описываемых новых технологий

Основные направления исследований связаны с тремя подходами для решения задач визуализации в биомедицине:

- поиском новых эффективных объектов, повышающих контраст и обеспечивающих высокое качество изображений, включая нанофосфоры, способные к антистоксовой люминесценции, золотые флуоресцентные нанокластеры, наноалмазы, нанорубины, плазмонно-резонансные частицы;
- безметочными (labelfree) технологиями, например, когерентной антистоксовской рамановской спектроскопии и микроскопии (CARS) и многофотонной микроскопии сверхвысокого разрешения;
- просветлением биотканей.

В настоящее время высока потребность в чувствительных, селективных, сравнительно недорогих и портативных биохимических датчиках, необходимых для медицинского оборудования и фармацевтической промышленности. Портативные биосенсоры, основанные на поверхностных плазмонных резонансах, позволят улучшить диагностическое обслуживание в отдаленных районах и расширить возможный набор реакций лиганд-рецептор для скрининга фармацевтического продукта на местах.

7.1.5. Оценки текущего и потенциального спроса для практических применений

Для глобального рынка биофотоники характерен высокий уровень конкуренции. Инновационная составляющая в этом бизнесе играет наиболее важную роль. Значительная часть прибыли компаний тратится на новые разработки и исследования, что является необходимым условием присутствия на этом рынке. Для завоевания части рынка новым компаниям потребуется большой начальный капитал, высокий научно-технологический потенциал и большие вложения в разработку новых приборов. Именно поэтому новые игроки

редко появляются на рынке биомедицинских применений фотоники.

Глобальный рынок инструментов биофотоники в 2013 г. составлял 25.16 млрд долл. США с прогнозом роста до 50.20 млрд долл. США к 2020 г. (то есть среднегодовой темп роста в 2014–2020 годах составит 10.4%) [7.39]. Если смотреть по сегментам применения биофотоники, то на первом месте стоит медицинская диагностика (⅔ глобального рынка инструментов биофотоники), следом идет терапия и немедицинские применения. В то же время рост рынка будет обусловлен в основном ростом в сегментах медицинской диагностики и немедицинскими применениями. Немедицинские применения биофотоники будут расти в связи с ужесточением регулирования пищевой промышленности как в Европе, так и в Северной Америке и Китае.

Согласно исследованиям, проведенным Transparency Market Research [7.39], на долю Северной Америки приходится сейчас приблизительно 35% рынка. К 2020 году ожидается небольшое снижение доли Северной Америки до 32%, что связано с ростом рынков Индии, Китая и Японии в связи с растущими затратами на медицинское обслуживание в этом регионе.

Объем мирового рынка биоимиджинговых технологий к 2017 году достигнет 37 млрд. долл. США (оценка GIA). При этом рост оценивается не менее 15% в год. Это связано как с целым рядом социальных факторов, так и с развитием науки, например, суперсовременных методов визуализации с одновременной регистрацией контрастирующих фармпрепаратов, которое можно использовать не только для визуализации, но и для лечения заболеваний. Примером таких систем может служить препарат CLR1502 (GLOW2), разработанный компанией Novelos Therapeutics, Inc., и предназначенный для выявления границ опухолевых структур на основе оптической томографии и одновременной терапии опухолей. Данная разработка является ярким примером оптической тераностики, объекты которой не только обеспечивают визуализацию, но и лечение.

Материалы, используемые для изготовления приборов биофотоники, находятся под постоянным мониторингом правительственных органов. Характерен высокий уровень

интеграции между производителями компонент и сборщиками конечного оборудования. Как правило эти две стадии производства объединены в одной компании, как, например, в компаниях Carl Zeiss A. G. и Oxford Instruments Plc.

Инструменты биофотоники находят применения в разных сегментах, таких как просвечивающая визуализация, микроскопия, внутренняя визуализация, спектрально-молекулярные, аналитические сенсоры, светотерапия, биосенсоры и других. Предполагается, что потребность в инструментах этих сегментов будет только расти:

- аналитические сенсоры — такие, как оксиметры пульсовые для измерения уровня насыщения крови кислородом, сиквенсинга и цитометрии. Ключевой принцип пульсовой оксиметрии состоит в том, что окисленный гемоглобин пропускает красный свет лучше, чем восстановленный. Основные компании, которые инвестировали в этот сегмент: Olympus Corporation и Becton, Dickinson and Co. Аналитические сенсоры делают возможным реализовать мониторинг состояние пациента на клеточном уровне;
- просвечивающая визуализация внутренних органов, на основе таких технологий как CT сканирование, магнитно-резонансная томография и рентгенография — являются безболезненными, простыми по процедуре и информативными методами;
- спектромолекулярные технологии широко используются для фармацевтики, пищевой промышленности и академических исследований;
- светотерапия, микроскопия поверхности привлекают все больший интерес с улучшением технологии.

Если, исходя из количества лечебных учреждений, которым могут быть необходимы вышеуказанные устройства и технологии, проводить оценки величины рынка РФ, то сумма может составлять несколько миллиардов долларов США (общее количество диспансеров в РФ составляет 2288, государственных и частных стоматологических центров — около 5000, только в Москве и Санкт-Петербурге — около 2800 лечебно-диагностических центров).

В ведущих клиниках РФ малоинвазивным методом с использованием эндоскопической техники выполняется более

40% хирургических вмешательств. Количество таких операции очень быстро растет; так в 1996 году в РФ было проведено около 2,5 тысяч эндоскопических операций, а в 2014 году — более 1,2 миллиона. На сегодня в системе медицинских организаций (МО) нашей страны насчитывается 4372 эндоскопических отделений и кабинетов, в которых проводится более 12 миллионов эндоскопических исследований. Согласно 63-ФЗ к 2020 году должно проводится не менее 30 миллионов эндоскопических исследований [7.40]. Почти для каждой эндоскопической операции, особенно для вмешательств, сопровождающихся идентификацией тканей на предмет патологии с последующей резекцией, необходимо наличие флуоресцентных или других маркеров, либо наличие безметочных методик, таких как CARS. Таким образом, самые скромные оценки рынка маркеров в РФ позволяют вести речь о сотнях миллионах рублей, только с продажи флуоресцентных маркеров патология/норма. Экономический эффект связанный с уменьшением вероятности врачебной ошибки при резекции патологической ткани, позволит сохранить жизнь и повысить ее качество миллионам жителей нашей страны. Кроме того, необходимо учитывать экономию на лечение рецидивов, вероятность которых сильно уменьшается при использовании флуоресцентных меток или других методик идентификации границы патология/норма.

Отдельного внимания заслуживают просветляющие агенты. На Западе есть патентованные ClearFocus и Scale, но их стоимость является очень высокой. Поэтому каждый разработчик диагностической аппаратуры разрабатывает свой просветляющий агент. Для просветления крови используются декстраны и Омнипак при получении ОКТ изображений стенки сосуда (но в очень ограниченных количествах). На горизонте 10 лет можно прогнозировать сопровождение всех оптических диагностических приборов иммерсионными жидкостями, что сформирует для них рынок, сопоставимый с рынком выпускаемых сейчас иммерсионных жидкостей для микроскопов. Однако, так как расход иммерсионных жидкостей для оптических диагностических приборов очевидно больше и шкала разнообразнее, то можно ожидать и существенно превышения размеров рынка для иммерсионных жидкостей микроскопов.

7.2. Системы адресной доставки лекарств, фототерапии и хирургии

7.2.1. Введение

Особенностью медицины будущего будет акцент на исследованиях перехода норма — патология. Это необходимо прежде всего для развития превентивной медицины, которая позволит существенно снизить издержки на медицинское обслуживание граждан. Изучение такой тонкой грани, которой является переход норма — патология требует не единичных диагностических процедур, а практически непрерывного мониторинга состояния организма на трех уровнях: клеточном, тканевом, системном. Решение данных задач невозможно без использования достижений фотоники, прежде всего сенсорных систем, например, на основе эффекта гигантского комбинационного рассеяния (ГКР), сенсоров на основе метаматериалов, которые позволяют определять наличие и концентрацию важных биохимических параметров, характеризующих работу организма. Важной особенностью функционирования таких систем является необходимость передачи данных от датчиков в гаджет обследуемого и далее в базу данных клиники и лечащего врача. Диагностику на уровне тканей также предполагается проводить с использованием фотонных технологий, оптической когерентной томографии и фотоакустики. На системном уровне необходимо реализовать запись информации о давлении и пульсе пациента, а также периодически реализовывать измерение кардиограмм и энцефалограмм и их оценку с использованием последних достижений в области анализа данных. Дальнейшие шаги связаны с анализом всей совокупности данных и поиском взаимосвязи между ними. Анализ данных позволит корректировать состояние пациента с помощью биоактивных веществ, которые предполагается инкапсулировать в так называемые депо, и обеспечить их дистанционное высвобождение в зависимости от данных, получаемых от биосенсорных систем, в том числе использующих для работы ГКР платформы. Оптика и оптоакустика могут быть использованы для перемещения и активации сенсорных систем и систем доставки лекарств. Фотоника и фотоакустика имеют

хорошие перспективы для доставки биологически активных веществ через барьеры (лазерная перфорация кожи, инъекции при проведении эндоскопических операции). Перспективным подходом также является комбинация акустического и лазерного воздействий, как для считывания информации с биосенсоров, так и для реализации дистанционного высвобождения инкапсулированных веществ. Отдельным направлением, аккумулирующим все достижения современной биофотоники, является создание искусственных тканей и органов. Успешная реализация перечисленных выше подходов приведет к развитию персонализированной медицины; снижению затрат благодаря своевременной диагностике и обеспечению более эффективного лечения, которое будет достигнуто за счет снижения терапевтической дозы в результате физической адресации микрообъектов, уменьшению времени и снижению стоимости доклинических исследований; и созданию наукоемких производств, комбинирующих фотонные и акустические технологии с автоматизацией измерений, микроэлектроникой и IT-технологиями.

7.2.2. Основные направления современных исследований и их практических применений (текущих и перспективных)

Для развития персонализированной медицины требуется разработка и создание новых систем доставки биологически активных веществ. К данным системам в настоящее время предъявляется целый ряд требований: биосовместимость и биодеградируемость, навигация и визуализация *in vivo*, доставка биологически активных веществ, нахождение и определение биологически важных маркеров, дистанционное высвобождение биологически активных веществ с помощью внешних воздействий с реализацией обратной связи в зависимости от концентрации маркеров, например, высвобождение инсулина в зависимости от концентрации глюкозы [7.41]. Для выполнения указанных выше требований необходимо решить несколько задач для создания нового типа умных носителей-контейнеров, включая создание контейнеров и инкапсуляцию биоактивных веществ, наведение и визуализацию (до и после деградации и деструкции), детектирование

физиологических маркеров, дистанционное высвобождение биоактивных веществ с помощью внешних воздействий. На сегодняшний момент известно несколько типов систем доставки биологически активных веществ, включая наночастицы [7.42], полимерные мицеллы [7.43], липосомы [7.44, 7.45], микрокапсулы [7.46–7.48]. Каждый способ имеет свои достоинства и недостатки. Для наночастиц размером меньше 20 нм и полимерных мицелл характерно достаточно длительное время циркуляции в системном кровотоке и достаточно предсказуемое биораспределение частиц в зависимости от времени [7.49]. Главный недостаток таких систем доставки связан с низкой загрузочной емкостью, которая, как правило, оказывается гораздо ниже необходимой терапевтической дозы. Липосомы свободны от последнего недостатка, но они не стабильны во времени, а также имеют узкий интервал допустимых температур для хранения. Учитывая сказанное выше, капсулы микронного и субмикронного размеров являются более обещающим объектом для создания систем доставки лекарств нового поколения [7.48]. На сегодняшний момент существует несколько подходов для создания доставки лекарств, а именно золь-гель метод [7.50], полимеризация миниэмульсий [7.51], метод последовательной адсорбции [7.52], инициируемая ультразвуком полимеризация эмульсии [7.53], электроспрей [7.54], электроформование [7.55]. Существенные достоинства метода последовательной адсорбции в том, что он может позволить разработать материалы с управляемой на наноуровне структурой и химическим составом и подойти к созданию микрокапсул с чувствительностью к внешним воздействиям. Тип биоактивных веществ и внешних воздействий для их высвобождения определяет распределение микрокапсул по организму, которым может управлять чип администрирования *in vivo*. Увеличение времени циркуляции объектов при внутривенном введении может достигаться в результате модификации их поверхности полиэтиленгликолем (ПЭГ) [7.56, 7.57].

Основной недостаток такого подхода связан с аллергической реакцией пациентов на ПЭГ [7.58]. Модификация носителей лекарств полиэтиленгликолем хорошо известна в литературе и часто использовалась для увеличения времени циркуляции наночастиц в кровотоке [7.59] и, как следствие,

увеличения вероятности их захвата клетками, либо увеличения вероятности взаимодействия в случае частичной модификации поверхности носителя антителами. Поскольку молекула ПЭГ сильно гидратирована, покрытие капсул данным полимером по сути «маскирует» объект от действия иммунной системы. В настоящее время сильно увеличивается процент населения с выраженной аллергической реакцией на ПЭГ [7.60, 7.61], причем прослеживается тренд к существенному его увеличению. Это связано с применением ПЭГ, прежде всего, в качестве составляющей кремов и мазей, в косметологии и медицине, как пищевой добавки — E1521, а также в сельском хозяйстве.

Другой тип реализации адресной доставки, так называемая химическая адресация, основанная на поверхностной модификации микроконтейнеров антителами, не работает in vivo благодаря ферментативному разложению вектора и эффекту «короны» [7.62]. В связи с этим, физическая адресация доставки лекарств является наиболее подходящим методом, который может быть реализован посредством градиента магнитного поля [7.63], методом оптического пинцета [7.64] или ультразвука [7.65, 7.66]. В любом случае для практического применения нанокомпозитных капсул необходимо определить где находятся нанокомпозитные капсулы после их *in vivo* введения, как можно обеспечить их навигацию до клетки/ткани мишени и с помощью какого воздействия возможна их активация. Ответы на эти вопросы помогут принять обоснованное решение при выборе биоактивного вещества, а также вида воздействия для дистанционного высвобождения.

В настоящее время используются следующие методы для визуализации систем доставки лекарств: магнитно-резонансная томография [7.67], ультразвуковая [7.68] и фотоакустическая визуализация [7.69, 7.70], рентгеновская томография [7.71], трехмерная диффузная флуоресцентная томография [7.72]. В целом современные системы доставки лекарств, кроме перечисленных выше функций, должны обеспечивать высокую чувствительность и избирательность к детектируемым веществам, обладать возможностью дистанционного считывания с минимальным воздействием на организм и способностью совмещения с современными

мобильными устройствами [7.48]. Среди всего многообразия подходов к считыванию полезного сигнала с сенсорных систем, наиболее широкое применение в современной диагностике получили оптические методы, например, флуоресцентная микроскопия, фотоакустическая микроскопия, спектрофотомерия, рамановская спектроскопия и микроскопия и другие. Одной из проблем, которые необходимо решить в ближайшее время, связана со сложностями химической адресации при реализации доставки. Сложности, прежде всего, связаны с ферментативным разложением антител и неспецифической адсорбцией белков на поверхность носителя лекарства. В настоящее время в качестве альтернативного подхода рассматривается физическая адресация, связанная с использованием физических воздействий для перемещения носителей лекарства или сенсора. К таким воздействиям относятся градиент магнитного поля, лазерное излучение (лазерный пинцет), акустическое поле (высокоинтенсивный сфокусированный ультразвук — HIFU).

Наряду с активным использованием физических методов адресации носителей биоактивных веществ, те же физические воздействия позволяют реализовать дистанционное высвобождения БАВ. Данный подход позволит решить несколько существующих проблем, а именно понизить стоимость и повысить эффективность лечения; увеличить процент высокотехнологичных производств в области создания отечественной медицинской техники и изделий медицинского назначения; значительно увеличить объем производства отечественныой медицинской техники и изделий медицинского назначения.

В настоящее время сформирован научный задел для использования современной лазерной техники в биомедицине, и становится возможным реализация концепции высокоскоростной хирургии с высоким пространственным разрешением. Данные успехи стали возможными благодаря появлению нано- и фемтосекундных лазеров, а также системным исследованиям, посвященным нахождению оптимальных диапазонов изменения длительности и мощности лазерных импульсов. Существенный вклад в данные исследования внес коллектив, возглавляемый профессором Альфредом Фогелем из института биомедицинской оптики (Любек, Германия)

Его группой накоплен огромный экспериментальный и теоретический материал (статьи по теме с 1997 года) и, как результат, получены данные об оптимальных длительности и мощности нано- и фемтосекундных импульсов лазерного излучения, которые позволяют создавать газовые пузырьки заданного размера и реализовать их локализацию с микронной точность. Поверхностная энергия, высвобождаемая при коллапсе такого пузырька, приводит к гибели клеток.

Другой подход связан с появлением нового объекта фотоники — спазера. Спазер (spaser — surface plasmon amplification by stimulated emission of radiation) — квантовый усилитель поверхностных плазмонов посредством стимулированной эмиссии излучения. Данный объект был предложен впервые Бергманом и Стокманом в 2003 г. [7.73]. Была показана возможность создания нанолазера на основе спазера. Это позволяет инкорпорировать данный источник лазерного излучения в клетку. В 2015 году впервые продемонстрировано биомедицинское применение спазера [7.74]. Установлено, что спазер позволяет реализовать воздействие на ткань с очень высокой степенью локализации [7.74]. Очень заманчивым представляется также использование данных систем в качестве источника излучения для работы имплантированных ГКР платформ.

Кроме того, данные технологии хорошо согласуются с методами инкапсуляции и создания сенсорных систем [7.48] и технологиями дистанционного высвобождения биоактивных веществ [7.73], которые можно использовать в технологии печати биологических тканей и органов.

В результате развития данного направления предполагается расширение производства нано- и фемтосекундных лазеров. Успех в данной области окажет существенное влияние на хирургию, а именно позволит существенно увеличить пространственное разрешение и уменьшить время проведения операций. Разработка и производство спазеров для биомедицинских целей обеспечит развитие, как вакуумных, так и технологий с использованием последних достижений коллоидной химии. Использование спазеров позволит реализовать проведение лечения и диагностики в масштабах одной клетки.

Особенностью интенсивно развивающейся области инжиниринга тканей и органов, является то, что приоритет в ней

принадлежит российским ученым. В этой связи прежде всего необходимо отметить одного из первооткрывателей метода трехмерной биопечати Владимира Миронова. В настоящее время Владимир Миронов является научным руководителем лаборатории биотехнологических исследований «3D Bioprinting Solutions» в Москве, в которой провели первую успешную трансплантацию щитовидной железы, напечатанную на 3D-биопринтере. Согласно информации, размещенной на сайте компании, щитовидная железа мышей перед трансплантацией была разрушена радиоактивным йодом. Операция прошла успешно и в результате, железа стала полностью функциональной. Биопечать может в будущем предложить новые подходы к лечению миллионов людей с нарушениями щитовидной железы. По статистике только в России и только от онкологических заболеваний щитовидной железы ежегодно страдают до 5 тысяч человек. В мире же более 665 миллионов человек имеют различные патологии этого органа. Учеными из Университета Карнеги-Меллон (Питтсбург, Пенсильвания) разработан метод трехмерной биопечати внутренних органов человека, в частности сердца и кровеносных сосудов. Адам Файнберг (Adam Feinberg) и его коллеги решили использовать при создании органов особый каркас на основе желатина. Техника получила название FRESH (Freeform Reversible Embedding of Suspended Hydrogels).

Существенно повысить технологичность биопринтинга позволяет подход, предложенный профессором Борисом Чичковым, который одним из первых в мире предложил и реализовал технологию лазерной печати клеток и тканей. Огромное количество ресурсов было потрачено на нахождение оптимальной мощности и длительности импульса для реализации безопасного перемещения клетки или капсул (содержащей несколько инкапсулированных клеток).

В развитие данного направления предполагается разработка био-, химических и фотонных технологий в сочетании с развитием микроэлектроники и IT-технологий. Успех в данной области окажет существенное влияние на прогресс в заместительной и трансплантационной хирургии и сделает доступными для широкого круга пациентов данные методы лечения. Ожидается, что в будущем подобные технологии избавят человечество от необходимости использования донорских органов.

7.2.3. Барьеры развития — научные и технологические

Научные трудности, связанные с пришивкой к поверхности систем доставки лекарств вектора для реализации принципа химической адресации, не является непреодолимой, и известны несколько подходов для пришивки адреса к поверхности микрокапсулы; тем не менее сами протоколы нуждаются в оптимизации и дальнейших исследованиях. Возникают трудности с необходимостью обеспечить защиту вектора адресной доставки от ферментной биодеградации в живых системах, причем данный процесс всегда сопровождается «корона»-эффектом — неспецифической адсорбцией белков крови, определяющим характер биораспределения наночастиц [7.62, 7.75], и с реализацией специфической адсорбции с помощью химической адресации систем доставки лекарств, поскольку размер контейнера (капсулы), составляет 1–5 мкм, что много больше, чем размер вектора. В результате работает эффект «паруса», т. е. сила Стокса, действующая на капсулы, превосходит силу взаимодействия мишень-вектор. В связи с этим, критически важным для решения задачи химической адресации систем доставки лекарств является переход в субмикронный режим и достижение размеров 200–300 нм. С использованием резонансных явлений при совместном действии электромагнитных и акустических полей для дистанционно-управляемого высвобождения биоактивных веществ и нанохирургии также возникают определенные затруднения.

Технологические трудности связаны с отставанием в технологии создания мощных импульсных лазерных систем нано- и фемтосекундном длительности, работающих в окне прозрачности биотканей, отставанием в технологии создания фазированных решеток в качестве источников ультразвука в Мега- и Гигагерцовом диапазонах;

- необходимостью подбора длительности импульса и мощности воздействия для конкретного хирургического вмешательства;
- трудностями синтеза наночастиц, позволяющих снизить мощность лазерного воздействия;
- разработкой спазеров с параметрами, оптимальными для биомедицинских применений и созданием тех-

нологий, обеспечивающих их массовое производство, а также применение в медицине для хирургии (проведение хирургических операций на клеточном и молекулярном уровне);
- созданием эффективных каркасов для тканевого инжиниринга, которые бы обеспечивали оптимальные условия для роста клеток, с одновременной управляемостью топологией тканей с помощью фотонных технологий;
- дистанционным изучением процессов метаболизма при выращивании тканей и, в перспективе, органов с помощью фотонных технологий;
- реализацией пространственного перемещения клеток и тканей с помощью фотонных технологий (аналог лазерной печати).

7.2.4. Временны́е горизонты и направления, на которых можно ожидать применения и коммерциализации описываемых новых технологий

В ближайшие 3–5 лет следует ожидать появление систем доставки лекарств с возможностью дистанционного высвобождения инкапсулированных биоактивных веществ и реализацией химической или физической адресации, а также с *in situ* контролем биораспределения лекарств с использованием современных диагностических комплексов; клиническое применение нано- и фемтосекундных лезеров для реализации высокоскоростной хирургии с высоким пространственным разрешением, на уровне размеров одной клетки.

В ближайшие 5–7 лет предполагается интеграция дистанционно управляемых систем доставки лекарств и биосенсеров, с использованием гаджетов для считывания информации, и, в соответствии с полученным сигналом, высвобождения инкапсулированных биоактивных веществ, а также массовой технологии создания спазеров и их биомедицинское применение.

В интервале 7–10 лет ожидается реализация печати тканей и органов за счет использования достижений современной фотоники, микро- и молекулярной биологии, а также биохимии.

7.2.5. Оценки текущего и потенциального спроса для практических применений

Размер мирового рынка, связанного с применением фотонных технологий для терапии будет составлять к 2020 г. 7.1 млрд. долларов США.

Согласно последнему коммерчески доступному прогнозу, мировой объем рынка только ГКР-платформ будет исчисляется десятками миллионов долларов. В целом объем рынка биосенсоров в 2015 должен составить 15 млрд. долларов [7.76].

Размер рынка медицинской лазерной техники в 2011 г. составлял 1117 млн. долларов в год, причем доля РФ составляла 2.1%. Согласно прогнозу, размер рынка медицинской лазерной техники к 2016 году составит 1737 млн. долларов, а доля РФ увеличится до 3.2% [7.77]. Ежегодный прирост рынка составляет примерно 9%. Более 90% оборудования, используемого в России, произведено за рубежом.

Экспоненциально будет развиваться рынок биомедицинских технологий, основанных на спазерах. Первый научный результат в биомедицинском направлении был получен в 2015 г. [7.74]. Поскольку данное направление плазмоники и фотоники достаточно развито в РФ, концентрация усилий в этой области может обеспечить приоритет РФ в плане системных исследования по биомедицинскому использованию спазеров и дальнейшему их применению в клинической практике. Оценка глобального рынка 3D-печати органов и тканей составляет 487 млн. долларов (в 2014 г.), причем ожидается непрерывный рост, который связан с увеличением среднего возраста населения высокоразвитых стран и ростом хронических заболеваний.

В 2015 году заметно увеличилось число групп, занимающихся биопечатью имплантов, органов и реконструкцией биотканей. В качестве примера, сотрудники университета Хериот-Ватт Шотландии создали биопринтер способный осуществлять печать плюрипотентных стволовых клеток. Они могут применяться для тестирования лекарств.

Другое достижение заместительной хирургии связано с успешно выполненной недавно операцией по трансплантации щитовидной железы мыши. Если результаты доклинических исследований будут обнадеживающими, компания намерена перейти к тестированию на людях в течение следующих двух лет [7.78].

8. Возможные сценарии развития и использования технологий фотоники

ФОТОННЫЕ технологии стали неотъемлемой частью современной жизни и обладают значительным потенциалом воздействия на научно-технический прогресс и состояние общества в последующие десятилетия. Быстрое развитие фотонных технологий, создание нового поколения элементов, приборов и систем передачи, обработки и хранения информации на их основе является общемировой тенденцией последнего десятилетия [8.1]. Для технологического и экономического развития Российской Федерации критически важно воспользоваться преимуществами зарождающихся технологий фотоники при создании новых конкурентоспособных продуктов на их основе, развития соответствующих секторов промышленности.

Представленные в книге материалы позволяют сформулировать некоторые выводы, относительно возможных сценариев развития отдельных направлений фотоники в России на фоне мировых трендов.

1. Уже в ближайшие годы можно ожидать внедрения в практику как «классических» систем передачи информации, так и технологий квантовой передачи, защищенной от неавторизованного доступа фундаментальными законами физики. В настоящее время такие линии связи доступны на рынке, однако они обладают ограниченной производительностью и дальностью передачи. В ближайшем десятилетии ожидается значительный прогресс в двух направлениях:

1) гибридизация защищенной и высокоскоростной передачи информации;

2) создание технологии информационных сетей на основе квантовых принципов передачи информации.

Обладание такими технологиями является критическим для стабильного и безопасного функционирования инфраструктуры современного общества. Состояние отдельных российских научно-технических разработок в этой области соответствует мировому уровню. При обеспечении эффективной координации усилий передовых отечественных коллективов и организаций по разработке технологий защищённой высокоскоростной передачи информации с использованием квантовых принципов в протяженных линиях связи и оптоволоконных сетях, есть основания создания и продвижения конкурентоспособных продуктов в этой сфере, развития промышленных и сервисных бизнесов, причем не только на российском, но и на глобальном рынке.

2. Важной мировой тенденцией является создание центров хранения и обработки больших объемов информации. К настоящему времени внутренний информационный трафик таких центров составляет заметную долю от общемирового трафика и сохраняет тенденцию стабильного роста. Рост доли внутреннего трафика также сопровождается заметным ростом потребления энергии центров хранения и обработки информации. Прогресс в этой области сдерживается отсутствием дешевых энергоэффективных и быстродействующих приёмно-передающих соединений. Отсутствие таких технологий является ключевым фактором, сдерживающим развитие данного сектора информационных технологий. В настоящее время наметились позитивные тенденции в области создания интерконектов высокой производительности на основе оптических волокон с интегрированными чипами. В частности, компания ИБМ продемонстрировала подобные устройства производительностью 100 Гбит/сек. Исходя из анализа развития технологий интерконектов в центрах хранения и обработки больших объемов информации можно с уверенностью ожидать значительного прогресса в этой области. Внутренняя логика развития автоматизированных систем управления инфраструктурами, обеспечивающими развитие и функционирование современного общества, требует создания центров обработки и хранения информации как неотъемлемой части самой инфраструктуры. Технология интерконнектов является критически важной. Недостатки присущие современной технологии являются «бутылочным

горлышком» ограничивающим возможности обработки информации и ее доставки потребителю. По этой причине нельзя пропустить технологический рывок в области интерконнектов, обусловленного развитием фотонных технологий. Необходима координация усилий как на международном уровне, так на внутрироссийском, по разработке технологий дешевых, энергоэффективных интерконектов высокой производительности с интегрированными электрооптическими преобразователями.

3. Два предыдущих десятилетия ознаменовались революционными достижениями в технологии передачи информации с использованием света и оптического волокна. Обработка информации до сегодняшнего дня производится средствами электроники. Учитывая ограничения присущие устройствам электроники, в мире предпринимались значительные усилия по созданию технологий обработки информации на основе устройств фотоники. На сегодняшний день наиболее перспективным направлением является гибридизация устройств оптики и электроники в одном чипе. Эта проблема находится в фокусе исследований ведущих мировых центров. Необходимыми условиями, предъявляемыми к таким чипам, являются высокая степень интеграции и создание аналога технологии «печати», совместимой как для электроники, так и для фотоники. Оба условия являются противоречивыми, учитывая разные масштабы длины волны и нано-масштабы современных технологий электроники, разницу материалов и технологий оптики и электроники. Эти противоречия привели к тому, что разработка оптоэлектронных чипов высокой степени интеграции становится очень трудной и амбициозной задачей.

Создание таких устройств является ключевым элементом, позволяющим преодолеть физические ограничения, которых достигло современное развитие электроники. Их наличие позволит существенным образом улучшить возможности технологической, информационной и общественной инфраструктуры, включая возможности средств вычислительной техники, что, в частности, критически важно для развития космической техники [8.2]. Следует отметить, что повышение степени интеграции устройств опосредованно влечет за собой появление новых функциональных возможностей.

Примером являются мобильные гаджеты, функциональный диапазон которых невозможно было представить 20 лет назад. Аналогичная ситуация имеет место в случае с оптоэлектронными чипами высокой степени интеграции. Описание функциональных возможностей устройств, которые возникнут с их появлением — задача весьма неблагодарная. В настоящее время в Российской Федерации идет активная работа по развитию микроэлектронной промышленности. Однако, даже при значительном росте инвестиций в отечественные компании возможности конкурировать с мировыми лидерами в этой сфере ограничены.

В то же время, сегодня сложилась уникальная ситуация, когда мир находится на грани рывка в области оптоэлектронных технологий высокой степени интеграции. Состояние научно-технических разработок в этой области позволят с уверенностью прогнозировать появление в ближайшее десятилетие технологий, позволяющих «интегрировать фотонику» в чипы. Таким образом для России возникли предпосылки для вхождения в состав разработчиков технологии, минуя фазу «преследования». Такой уникальной возможностью следует, безусловно, воспользоваться. Невнимание к данной проблеме приведет в будущем к ситуации, схожей с нынешней ситуацией в микроэлектронике со значительно более глубоким отрывом уровня технологического развития критической области. В России существует богатый интеллектуальный потенциал с достаточно высоким уровнем экспертизы в данной области. Однако, развитие этой технологии требует координации активностей разрозненных сегодня научных коллективов, коммерческих компаний, различных финансовых институтов, продуманной международной кооперации.

4. Квантовые вычисления привлекают пристальное внимание исследователей в течение последнего десятилетия. Концепция квантового компьютера довольно хорошо изучена теоретически. Однако, несмотря на то что компания D-Wave недавно продала компании Google первую квантовую вычислительную систему, предстоит еще долгий путь для того, чтобы можно было коммерциализировать квантовый компьютер как реальный потребительский товар. Однако недавние успехи в области экспериментальной отработки

технологий, направленных на создание квантового компьютера и, особенно, реализацию идей по созданию квантовых симуляторов, внушают умеренный оптимизм. Вполне возможно, что в ближайшее десятилетие будет достигнут успех в данном технологическом сегменте.

Квантовые вычисления весьма привлекательны с точки зрения спектра возможностей, которые они открывают. Даже при высоких рисках технологических неудач в ходе разработок в этом направлении, представляется целесообразным продолжить исследования в области квантовых компьютеров и расширить их на изучение и разработку квантовых симуляторов, позволяющих решать задачи специального типа. Международная кооперация в этой сфере крайне важна для сохранения темпа работ и получения практических результатов без отставания от мирового уровня.

5. Стремительно растущей областью применения фотоники является биомедицина. Фотонные технологии открывают новые возможности в области предотвращения болезней, диагностики, хирургии, визуализации, терапии, сенсорики, адресной доставки лекарственных препаратов, 3D-печати для воспроизведения живой ткани и многое другое. Новым применением фотонных технологий в биомедицине являются исследования мозга и исследования в области оптогенетики. Отдельным направлением является развитие технологии «умных» биологических сенсоров для мониторинга состояния организма. Биофотоника представляет быстро растущий рынок с очень широким спектром разнообразных технологий. В России создан хороший задел и имеется значительный потенциал выхода на определенные сегменты этого рынка. Развитие фотонных технологий в медицине позволит внедрить новые, прогрессивные формы медицинского обслуживания. Весьма своевременным является создание единого координирующего центра в этой области на базе Российского центра биофотоники. В области биофтоники возможна и эффективная международная кооперация.

Заключение

ФОТОННЫЕ технологии сегодня и уже в ближайшем будущем обещают существенные изменения в конфигурации глобального рынка передачи, обработки и хранения информации. Постепенная, «тихая», «ползучая» «фотонная технологическая революция» уже дает о себе знать пока на отдельных сегментах этого рынка, но будет чувствоваться все сильнее не только профильными промышленными бизнесами, но и конечными потребителями. У России есть хорошие шансы найти и занять свои ниши в ходе изменения конфигурации обсуждаемого рынка. Для этого надо хорошо и масштабно понимать научное и технологическую содержание происходящего, развивать нужные компетенции в сфере исследований и разработок, стимулировать растущие компании, рискующие входить в эту новую сферу, эффективно кооперироваться внутри страны и за ее пределами для удержания темпов разработок и формирования прорывов на рынки.

При рассмотрении потенциальных технологий будущего на основе фотоники были опущены примеры описания масштабных, важных направлений их применения, относящиеся как к научным и экономическим проблемам, так и к повседневной жизни.

Так, например, новых возможностей от информационных систем ожидают перспективные производственные технологии, все больше переходящие к мощным виртуальным моделям, использующим уже триллионы записей и имеющим тенденцию к значительному усложнению. В книге не обсуждаются и проблемы развития «силовых лазеров» для промышленного использования [9.1].

Тема продолжения освоения космического пространства, дальних полетов, расширение области применения автономных, непилотируемых устройств для этих целей, неразрывно связана с ожиданием следующего поколения вычислительной техники, немыслимым без широкого использования фотонных технологий [9.2].

И уж, конечно, неисчерпаема сфера повседневной жизни. Спектр возможностей новых фотонных технологий очень широк и широко обсуждается в средствах массовой информации, в научно-популярной литературе, в концептуальных разработках о развитии технологий, экономики, общества [9.3, 9.4]. Однако следует подчеркнуть, что создание устройств, подобных оптоэлектронным чипам с высокой степенью интеграции, неизбежно приведет к появлению бытовых устройств с новыми и неожиданными функциональными возможностями подобно тому, что произошло на рубеже 2000 годов с электронными приборами.

Приложение. Некоторые мнения представителей научного сообщества о направлениях поддержки фотоники в России

В ДАННОМ разделе суммированы мнения экспертов, которые принимали участие в подготовке разделов, посвященных развитию отдельных технологий и/или структур и материалов фотоники. При анализе были использованы также результаты опросов представителей компаний, работающих в области фотоники, что сделало картину возможных мер государственной политики более разнообразной. Опросы представителей (как правило, руководителей) компаний были проведены в период с октября по декабрь 2015 г. в 8 компаниях, расположенных в 3 регионах России.

Все предложенные меры можно классифицировать как (1) относящиеся к инструментам научно-технологической политики, и (2) к мерам экономической политики. Подавляющее большинство мер, предложенных специалистами, относится к первой группе.

В области научно-технологической политики ясно идентифицированной проблемой являются пробелы в целеполагании, выражающиеся в том, что фотоника не входит в число государственных приоритетов (имеются в виду действующие приоритетные направления развития науки, техники и технологий и соответствующие им перечни критических технологий, которые были утверждены Президентом РФ в 2011 г.). Поэтому предложено включить фотонику в данный список приоритетных направлений, а ряд технологий, например, лазерные — в перечень критических технологий РФ. Это касается не только технологий и устройств, но и материалов для фотоники. На данный момент в перечень критических технологий Российской Федерации входят 27 технологий, из них только 3 можно отнести к материалам, технологиям их обработки, материаловедению и созданию элементной базы:

- «Технологии получения и обработки конструкционных наноматериалов»;
- «Технологии получения и обработки функциональных наноматериалов»;
- «Технологии создания электронной компонентной базы и энергоэффективных световых устройств».

Эти технологии не затрагивают оптические материалы, которые лежат в основе всех направлений фотоники и без которых построение принципиально новых элементов и устройств фотоники невозможно. Поэтому для успешного развития оптических материалов, технологий их синтеза и обработки для задач фотоники, необходимо, по мнению экспертов, включить направления по оптическому материаловедению в перечень критических технологий Российской Федерации.

В дополнении к этому эксперты считают важным разработать по отдельным технологиям дорожные карты в рамках реализации Национальной технологической инициативы.

Указывалось также на отсутствие стратегии и прогноза развития рынка телекоммуникаций. Таким образом в области целеполагания, с одной стороны, нет признания на государственном уровне важности научных и технологических направлений фотоники, а с другой — нет данных о потенциале развития рынков, где новые технологии фотоники могут найти применение.

Приоритетные направления реализуются, как правило, через механизм *федеральных целевых программ*. Предложено скорректировать их после включения фотоники и отдельных ее технологий в список приоритетов. Кроме того, для ряда областей применения фотоники целесообразно сформировать специальные отраслевые программы. Это касается в первую очередь такой дорогой и трудоемкой сферы, как космическая фотоника.

В области космической фотоники предложено инициировать *отраслевую комплексную целевую программу «Фотоника для космоса»,* включающую дорожную карту создания и внедрения конкретной номенклатуры изделий, в первую очередь в космическом приборостроении. После окончания разработки такой программы целесообразно провести ее всестороннее обсуждение на научно-техническом совете

Роскосмоса, по результатам которого она может быть принята для реализации организациями космической отрасли.

Для успешного развития технологий передачи информации в оптическом диапазоне спектра с борта космических аппаратов, в России, в рамках перспективной Федеральной космической программы, необходимо организовать реализацию комплексного проекта по созданию оптической системы ретрансляции. Результатом ее должно стать доведение разрабатываемых технологий до уровня технологической готовности не ниже 7. На первом этапе, сроком от 3 до 5 лет, должны осуществляться преимущественно НИР и ОКР.

После реализации первой стадии проекта можно будет приступать ко второму этапу — серийному производству оборудования оптической передачи информации и развертыванию сегментов системы, определив космические платформы для их потенциальной установки, с доведением уровня технологической готовности критических технологий до 10. Реализация второго этапа должна занять максимум 5 лет и по его итогам серийными терминалами передачи информации в оптическом диапазоне должны быть оснащены все низкоорбитальные космические аппараты дистанционного зондирования, а также изделия, требующие существенной пропускной способности для передачи целевой информации. Кроме того, необходимо развернуть 2–3 специализированных геостационарных космических аппарата (или рассмотреть возможность дополнительного размещения «оптической» полезной нагрузки), для ретрансляции информации в радио или оптическом диапазоне спектра на земные станции.

Еще одной перспективной формой организации работ (в основном НИОКР) в области фотоники признаны *проектные консорциумы*. В частности, такая форма может быть оптимальной для решения задачи создания квантового компьютера на сверхпроводниковых кубитах. В такой проект могли бы войти недавно созданные в России лаборатории и технологические центры, располагающие необходимым базовым оборудованием и научными кадрами высокой квалификации. К ним относятся, в частности, Российский квантовый центр, МФТИ, МИСиС, ВНИИА, МГТУ им. Н. Э. Баумана и НГТУ. В рамках такой кооперации должны быть задействованы ведущие российские ученые, работающие над задачей

создания квантового компьютера на сверхпроводящих кубитах. Кроме того, возможно формирование таких консорциумов в рамках специальной *Национальной программы по созданию квантового компьютера*.

Фокус на НИОКР необходим в еще одной области – полупроводниковой фотонике. За последние 10 лет большинство научных разработок в этой сфере было проведено институтами РАН и малыми компаниями, созданными на базе академических институтов или их сотрудниками. При этом государственное финансирование технологической инфраструктуры данных организаций все эти годы практически отсутствовало. Университетские разработки в области полупроводниковых фотонных технологий пока не в состоянии составить серьезную конкуренцию академическим институтам и малым предприятиям. Однако следует отметить, что прогресс происходит там, где налажено взаимодействие университетов с сотрудниками академических институтов. Задача – *поддержать такие естественно сформировавшиеся консорциумы*. Существенным компонентом их финансирования должно быть безвозмездное финансирование инфраструктуры и дорогостоящего технологического и, что немаловажно, новейшего экспериментального и диагностического оборудования всех участников консорциума, без которого на современном этапе сложные технологические разработки принципиально невозможны. При целевой поддержке таких разработок должны отсутствовать требования по привлечению «внебюджетных» источников финансирования, а также организовано освобождение от налога на закупку уникального технологического и экспериментального оборудования. Усилия и поддержка государства должны быть в первую очередь направлены на финансирование разработок сложных, наукоемких и стратегических технологий, превосходящих зарубежные аналоги и обеспечивающих повышение уровня обороноспособности страны, а также имеющих возможность выхода на международный рынок. При этом именно государство должно обеспечить правовую защиту и поддержку зарубежного патентования таких, прошедших полноценную патентную экспертизу в России, разработок.

Поддержка государством крупных проектов по развитию технологической инфраструктуры и опытных производств

актуальна для многих направлений фотоники: производства вертикально-излучающих лазеров, развития квантовой передачи информации, отработки технологий фотонных интегральных схем и т. д.

В тех областях фотоники, где научное отставание от мирового уровня особенно сильное, также предлагается использовать инструмент консорциумов, но осуществлять поддержку в два этапа, с начальным привлечением средств действующих государственных фондов — РФФИ и РНФ. Речь, в частности, идет о таких областях, как биофотоника, в том числе адресная доставка лекарств. Для реализации проектов по адресной доставке лекарств необходимо проведение РФФИ и РНФ специальных конкурсов на получение финансирования для реализации проектов, которые объединяли бы научные коллективы ведущих университетов и научных центров страны с коллективами успешно функционирующих фирм (получающих финансирование, например, от Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере), занимающихся разработкой и выпуском наукоемкой и высокотехнологичной продукции. Такой конкурс следовало бы проводить в два этапа: целью первого этапа должна быть проверка принципиальной осуществимости работ (proof of concept). Он может продолжаться три года, с ежегодным финансирование до 15 млн. рублей на консорциум (сетевой коллектив). В случае успеха на первом этапе, второй – это проведение НИОКР и масштабирование для производства. Финансирование второго этапа может составлять от 100 млн. в год на консорциум (сетевой коллектив). Важно при этом уже на этапе постановки задач привлекать к выполнению проекта научно-производственные предприятия. Такая конструкция может быть также реализована через два механизма. Первый, это финансирование фондами (этап 1), по схеме ориентированных фундаментальных исследований, в том числе проектов, реализуемых в интересах компаний (такие конкурсы проводились РФФИ, например, РФФИ-РЖД). Второй — это реализация работ по схеме, опробованной в рамках Постановления правительства №218.

Наконец, есть ряд перспективных областей фотоники, где у России научно-технический задел крайне мал, и при этом требуются значительные затраты для развития. Их под-

держка должна идти не только через научные фонды, программы фундаментальных исследований, но и, обязательно, в международной кооперации. Пример такой области — оптические соединения и оптоэлектронные компоненты для наноэлектроники. Для эффективного вхождения России в эту область потребуется примерно 10 лет. Общим трендом последних лет является объединение усилий ведущих мировых игроков для решения задач, связанных с интеграцией фотоники в компьютерные технологии. Существенный рост рынка в данной области ожидается после 2024–2025 гг.

Помимо собственно участия в международных научных проектах, важно расширение международного сотрудничества в таких сферах деятельности, как приглашение зарубежных исследователей, стажировки, обмен студентами, совместная организация конференций. В частности, в рамках развития связей с учеными — представителями научной диаспоры, возможна реанимация программы стажировок российских студентов и аспирантов в лабораториях соотечественников за рубежом. С участием Минобрнауки и заинтересованных университетов (особенно из числа участников проекта 5-топ-100, располагающих существенными средствами) возможно организовать стажировки студентов и аспирантов продолжительностью от 3 до 6 месяцев. Цель — научная практика и прослушивание курса лекций, которые читаются в зарубежных университетах. Поддержку должны получать стажировки только по темам, признанным приоритетными на государственном уровне. В частности, к таким тематикам относятся те, которые включены в Скоординированную программу по развитию фотоники в РФ.

Выбор лабораторий, где стажироваться, остается за студентами. Выбор студентов, желающих пройти стажировку в выбранной лаборатории — за руководителем лаборатории. Это обеспечивает взаимный интерес к совместной работе. При этом отбор лабораторий для участия в программе стажировок должен проводиться с участием внешних экспертов, в том числе через организованные диаспорные сети (RASA, RuSciTech, др.). Это важно для того, чтобы оставить в составе участников программы только лаборатории, имеющие высокую международную репутацию. Образовательный компонент в таких программах очень важен, так как, согласно

мнению экспертов, необходимо готовить инженеров для создания приборов и устройств фотоники, которые будут эксплуатировать квантовые технологии второго поколения. В свою очередь опрошенные средние компании указали на важность организации обучающих тренингов по работе с новыми технологиями, поскольку самим им не хватает для этого масштаба и ресурсов.

Отдельной проблемой является малое количество компаний, работающих в области фотоники или потребляющих технологии фотоники, и потому малая востребованность результатов НИОКР на внутреннем рынке. Так, в России индустрия производства оборудования для когерентных линий связи представлена фактически одной фирмой «Т8», которая выпускает аппаратуру, не уступающую по техническим характеристикам лучшим зарубежным аналогам. При этом фирмы-провайдеры (например, Ростелеком) предпочитают покупать зарубежное оборудование, по следующим причинам:

Реклама и имидж

- мировой бренд, нет имиджевых рисков;
- антиреклама российского оборудования;
- мощное лоббирование иностранного оборудования.

Технологии

- западные вендоры-ТНК с миллиардными оборотами предлагают полную линейку;
- нет крупного производителя отечественного оборудования.

Финансы

- система закупок рассчитана на импорт;
- рассрочка платежа на импортное оборудование;
- таможенные пошлины ниже на оборудование, чем, на комплектующие.

Выход из создавшегося положения специалисты видят в создании крупной телекоммуникационной компании с государственным участием, с ориентацией на такой зарубежный аналог, как китайская HUAWEI. Новая структура должна объединить в рамках одной программы развития несколько производителей телекоммуникационного оборудования. Начальный капитал должен быть предоставлен на паритетных началах государством и частными инвесторами, чтобы учи-

тывались как бизнес-интересы, так и интересы государства. Компании надо предоставить налоговые и иные льготы на время развития и до момента, когда она сможет конкурировать с зарубежными производителями. Сильной ее стороной, которая позволит в минимальные сроки выйти на режим самоокупаемости, должно стать разумное планирование и гарантированные рынки сбыта. Гарантией качества продукции будет требование соответствия характеристик лучшим зарубежным аналогам. Такая компания должна строить свою деятельность на основе международного сотрудничества, с партнерами из стран Западной Европы, США и остальными партнерами, заинтересованными в выходе на рынок стран ЕврАзЭС. Основными задачами компании должны стать обеспечение технологической независимости волоконно-оптических линий связи и вопросы информационной безопасности. При всей внешней привлекательности такого подхода, однако, он может привести к усилению монополизации на рынке.

Второй блок предлагаемых мер касается экономического регулирования и стандартизации.

Эксперты отметили важность создания нормативной базы, отраслевых стандартов и регламентов, проведения мероприятий по разработке государственных стандартов в области квантовых технологий, создания специализированных центров лицензирования и сертификации.

К мерам экономического регулирования, важным для развития фотоники, можно отнести:

- стимулирование экспорта передовых технологий и приборов;
- значительное снижение таможенных барьеров для экспорта инновационной продукции и импорта высокотехнологичных компонентов;
- кардинальная и регулярная корректировка списка товаров и технологий двойного назначения, экспорт которых контролируется, с привлечением представителей науки и бизнеса;
- стимулирование спроса на лазерные технологии путем введения специальных налогов на старое оборудование, сокращение срока амортизации станков, возмещения части затрат экспортерам;

- восстановление и развитие практически утерянной за последние 20 лет материальной базы современной полупроводниковой фотоники.

Все перечисленные меры экономического регулирования были упомянуты без подробного рассмотрения, в том числе без оценки возможностей и издержек их введения.

Список использованных источников

Глава 1

1.1. Optics and Photonics: Essential Technologies for our Nation // Электрон. дан.— США, 2013.— Заглавие с экрана.— Режим доступа: http://www.nap.edu/catalog/13491/оцptics-and-photonics-essential-technologies-for-our-nation.

1.2. Anderson S.G. (2015) Latest SPIE industry analysis quantifies biophotonics-enabled sector [Электронный ресурс]: URL: http://spie.org/x113223.xml.

1.3. Abbott L. (2015) Measuring photonics' impact: It matters // Электрон. дан.— Заглавие с экрана.— Режим доступа: http://spie.org/x114638.xml.

1.4. Publication & Report Library // Электрон. дан.— Заглавие с экрана.— Режим доступа: http://www.osa.org/en-us/corporate_gateway/publications/publication_report_library/

1.5. Hausken T. (2015) A Half-Trillion-Dollar Industry // Optics&Photonics News, April 2015.

1.6. Hausken T. (2015) Photonics: Global Markets & Regional Trends or What do the numbers really say? // Электрон. дан.— Заглавие с экрана.— Режим доступа: http://www.marketplaceseminar.com/content/dam/lfw/Documents/LPMS-Hausken-Tom-2015.pdf

1.7. Photonics. Industry Report 2013. Key Data // Электрон. дан.— ЕС, 2013.— Заглавие с экрана.— Режим доступа: http://www.photonics21.org/download/Photonics_industry_report_2013/photonics_industry_report_2013.pdf

1.8. EPIC Members Event Report. OPTO Taiwan // Электрон. дан.— Заглавие с экрана.— Режим доступа: http://www.epic-assoc.com/wp-content/uploads/2015/07/EPIC-EVENT-REPORT-38-Taiwan-Photonics-Market-Report-2015.pdf

1.9. Stephen G. Anderson (2015) SPIE Industry Update. Presentation. San Francisco, February 9.

1.10. Peach M. (2015) SPIE ups value of global photonics trade to $182 billion // Электрон. дан.— Заглавие с экрана.— Режим доступа: http://optics.org/news/6/8/24

Глава 2

2.1. National Research Council (NRC), Committee on Harnessing Light: Capitalizing on Optical Science Trends and Challenges for Future Research; National Materials and Manufacturing Board; Division on Engineering and Physical Sciences (2013) Optics and Photonics: Essential Technologies for our Nation. // Электронный ресурс. URL: http://www.nap.edu/catalog/13491/optics-and-photonics-essential-technologies-for-our-nation

2.2. National Research Council (NRC), Committee on Optical Science and Engineering; Commission on Physical Sciences, Mathematics, and Applications; Division on Engineering and Physical Sciences (1998) Harnessing Light: Optical Science and Engineering for the 21st Century. // Электронный ресурс. URL: http://www.nap.edu/catalog/5954/harnessing-light-optical-science-and-engineering-for-the-21st-century

2.3. Wills S. (2014) Finding a Voice for Photonics. Optics and Photonics News, Vol. 25, Issue 9, September.

2.4. Ferry J. (2012) Global Trends in Optical Manufacturing. Optics and Photonics News, Vol. 23, Issue 3, March.

2.5. Daukantas P. (2010) Venture Capital and Angel Funding: Making It Work in 2010 // Optics and Photonics News, Vol. 21, Issue 9, September.

2.6. FTAC-OP (2014) Building a Brighter Future with Optics and Photonics. // Электронный ресурс. URL: https://www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ostp/NSTC/ftac-op_pssc_20140417.pdf

2.7. The White House (2014) Fact Sheet: President Obama Announces New Manufacturing Innovation Institute Competition. October 03. // Электронный ресурс. URL: https://www.whitehouse.gov/the-press-office/2014/10/03/fact-sheet-president-obama-announces-new-manufacturing-innovation-instit

2.8. Illich P., Hull D., Ruggiere P. (2012) Industry Demand for Two-Year College Graduates in Optics and Photonics Technology. // Электронный ресурс. URL: http://www.op-tec.org/pdf/2012_Needs_Assessment_Summary_Report_Revised_02222013.pdf

2.9. Overton G. (2015) NPI applauds DOD finalists for Integrated Photonics Institute. LaserFocusWorld. // Электронный ресурс. URL: http://www.laserfocusworld.com/articles/2015/02/npi-applauds-dod-finalists-for-integrated-photonics-institute.html

2.10. Mertin M. (2014) Photonics: fostering a new wave of industrial innovation. // Электронный ресурс. URL: http://www.euractiv.com/section/trade-society/opinion/photonics-fostering-a-new-wave-of-industrial-innovation/

2.11. Photonics Unit of European Commission (Photonics Unit) (2010) An Overview of Photonics Innovation Clusters and National Technology Platforms in Europe. // Электронный ресурс. URL: http://cordis.europa.eu/fp7/ict/photonics/docs/eu-report-on-photonics-innovation-clusters-june2010.pdf

2.12. Photonics21 (2013) A Photonics Private Public Partnership in Horizon2020. // Электронный ресурс. URL: http://www.photonics21.org/download/Photonics21_Association/A_Photonics_Private_Public_Partnership_Photonics_PPP_proposal_final-final.pdf

2.13. European Commission (2009). Preparing for our future: Developing a common strategy for key enabling technologies in the EU. // Электронный ресурс. URL: https://ec.europa.eu/digital-agenda/sites/digital-agenda/files/COM(2009)512.pdf

2.14. SPIE (2013) Signing of Horizon 2020 partnership will strengthen European photonics, says Kroes. // Электронный ресурс. URL: http://spie.org/newsroom/1217-horizon2020

2.15. SPIE (2014) Photonics innovation in Europe's Horizon 2020, SPIE Professional, January. // Электронный ресурс. URL: https://spie.org/membership/spie-professional-magazine/spie-professional-archives-and-special-content/spie-professional-archives/archived-issues/2014_jan_archive_spie_pro/2014-january/optics-and-photonics-indu-x105081-ml

2.16. Wilkens M. (2013) Photonics — Towards a Public Private Partnership in Horizon2020.

2.17. Photonics21 (2013b) Towards 2020 — Photonics Driving Economic Growth in Europe. // Электронный ресурс. URL: http://www.photonics21.org/download/Brochures/Photonics_Roadmap_final_lowres.pdf

2.18. OITDA(2015)AnnualTechnicalReport2014. // Электронный ресурс. URL: http://www.oitda.or.jp/main/ar/atr2014.pdf

2.19. MEXT (2007) Interim Report for the Promotion of Photon Science and Technology. // Электронный ресурс. URL: http://www.photonfrontier.net/files/Interim%20report-MEXT-JPN.pdf

2.20. EAC (2015) Political Steering Processes in Asia Aimed at the Photonics Industry. Executive Report. // Электронный ресурс. URL: http://www.photonics21.org/download/Photonics-EAC-Asiastudy_Executive-Report_Web.pdf

2.21. OECD (2012) Industrial Policy and Territorial Development: Lessons from Korea, Development Centre Studies, OECD Publishing.

2.22. LAgency(2011)PhotonicsinChina. // Электронный ресурс. URL: http://www.dutchphotonics.nl/assets/Uploads/Documents/Market-Survey-Photonics-in-China-Final.12.11.pdf

2.23. Miao J.T., Hall P. (2014) Optical illusion? The growth and development of the Optics Valley of China. Environment and Planning C: Government and Policy, 32 (5). // Электронный ресурс. URL: http://eprints.gla.ac.uk/98479/1/98479.pdf

Глава 3

3.1. Технологическая платформа «Инновационные лазерные, оптические и оптоэлектронные технологии — фотоника» (2015) Стратегическая программа на 2015-2025 г. (// Электронный ресурс. URL: http://www.photonica.cislaser.com/data/data/dokumenty/strateg.prog.2015-2025.pdf)

3.2. Технологическая платформа «Инновационные лазерные, оптические и оптоэлектронные технологии — фотоника». Дорожная карта по развитию фотоники в Российской Федерации в 2013–2020 гг. Пояснительная записка (// Электронный ресурс. URL: http://www.photonica.cislaser.com/data/data/dokumenty/dorozhnaya.karta.pdf).

3.3. Стратегическая программа исследований ТП «Фотоника» (предварительная версия) (2012).

3.4. Ковш И.Б. (2016) Производство продукции фотоники в России // Лазер-Информ, №3-4, февраль.

3.5. Сапрыкин Д.Л. (2014) Российский рынок и производство лазерного технологического оборудования в контексте развития станкостроения // Лазер-информ, №1.

3.6. Попов С. (2015) Пермь как столица волоконной оптики // Первая миля, №53.

3.7. Николаев А.В. (2016) Российское оптическое волокно // Первая миля, №54.

3.8. Механик А. (2016) Закупать российское невыгодно тем, кто принимает решения // Эксперт, №11.

Глава 4

4.1. The Nobel Prize in Physics 2000 / Электрон. дан. / [Электронный ресурс] // URL: https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2000/

4.2. Molecular beam epitaxy / Электрон. дан./ [Электронный ресурс] // URL: http://www.eee.manchester.ac.uk/our-research/research-groups/sisp/research-areas/emds/molecular-beam-epitaxy/

4.3. Leo Esaki, Nobel Prize winner in physics, 1973

4.4. UV-LEDs Report // Yole Developpement / Электрон. дан.— Лион, Франция, 2013.— [Электронный ресурс] // URL: http://www.yole.fr/iso_upload/news/2013/pr_uv%20led_yole%20developpement_march2013.pdf.

4.5. Hirayama, H. Recent progress and future prospects of AlGaN-based high-efficiency deep-ultraviolet light-emitting diodes / H. Hirayama, N. Maeda, S. Fujikawa, S. Toyoda, N. Kamata // Japanese Journal of Applied Physics.— 2014.— v. 53.— P. 100209-1 — 100209-10.

4.6. Shatalov, M. High power AlGaN ultraviolet light emitters / M. Shatalov, W. Sun, R. Jain, A. Lunev, X. Hu, A. Dobrinsky, Y. Bilenko, J. Yang, G. A. Garrett, L. E. Rodak, M. Wraback, M. Shur, R. Gaska // Semiconductor Science and Technology.— 2014.— v. 29.— P. 084007-1 — 084007-2.

4.7. Mainster, M. A. Wavelength selection in macular photocoagulation. Tissue optics, thermal effects, and laser systems / M. A. Mainster // Ophthalmology.— 1986.— v. 93.— P. 952-8.

4.8. Hameda, H. Room temperature CW operation of 610 nm band AlGaInP strained multiquantum well laser diodes with multiquantum barrier / H. Hameda, K. Tominaga, M. Shoho, S. Honda, K. Yodoshi, T. Yamaguchi // Electronic Letters.— 1992.— v. 28.— P. 1834 — 1836.

4.9. Kaneko, Y. 600-nm Wavelength Range GaInP/AlInP Quasi-Quaternary Compounds and Lasers Prepared by Gas-Source Molecular-Beam Epitaxy / Y. Kaneko, I. Nomura, K. Kishino, A. Kikuchi // Journal of Applied Physics.— 1993.— v. 74.— P. 819–824.

4.10. Haase, M. A. Blue-green laser diodes / M. A. Haase, J. Qiu, J. M. Depuydt, H. Cheng // Applied Physics Letters.— 1991.— v. 59.— P. 1272–1274.

4.11. Ivanov, S.V. Molecular beam epitaxy of wide-gap II-VI laser heterostructures / S.V. Ivanov, S.V. Sorokin, I.V. Sedova // In: Henini M, editor. Molecular Beam Epitaxy: From research to mass production.— Elsevier Inc.— 2013.— P. 611–630.

4.12. Kato, E. Significant progress in II-VI blue-green laser diode lifetime / E. Kato, H. Noguchi, M. Nagai, H. Okuyama, S. Kijima, A. Ishibashi // Electronics Letters.— 1998.— v. 34.— P. 282–284.

4.13. Nakamura, S. Continuous-wave operation of InGaN/GaN/AlGaN-based laser diodes grown on GaN substrates / S. Nakamura, M. Senoh, S. Nagahama, N. Iwasa, T. Yamada, T. Matsushita, H. Kiyoku, Y. Sugimoto, T. Kozacki, H. Umemoto, M. Sano, K. Chocho // Applied Physics Letters.— 1998.— v. 72.— P. 2014–2016.

4.14. Zhao, P. Compact 4.7 W, 18.3% wall-plug efficiency green laser based on an electrically pumped VECSEL using intracavity frequency doubling / P. Zhao, B. Xu, R. van Leeuwen, T. Chen, L. Watkins, D. Zhou, P. Gao, G. Xu, Q. Wang, C. Ghosh // Optics Letters.— 2014.— v. 39.— P. 4766–4768.

4.15. OSRAM Opto Semiconductors. // Электрон. дан.— Германия, 2015.— [Электронный ресурс] // URL: http://www.osram-os.com/osram_os/en/products/product-catalog/laser-diodes/visible-laser/index.jsp.

4.16. Adachi, M. InGaN based green laser diodes on semipolar GaN substrate / M. Adachi // Japanese Journal of Applied Physics.— 2014.— v. 53.— P. 100207-1 — 100207-8.

4.17. NICHIA. // Электрон. дан.— Япония, 2013.— [Электронный ресурс] // URL: http://www.nichia.co.jp/jp/product/laser.html

4.18. New Market Research on the World Market for Military Infrared Imaging Detectors and Systems (Vol. IRW-M, 2015 Edition) by Maxtech International, Inc. (кр. содержание). // Электрон. дан.— США, 2015.— [Электронный ресурс] // URL: http://www.prnewswire.com/news-releases/new-market-research-on-the-world-market-for-military-infrared-imaging-detectors-and-systems-vol-irw-m-2015-edition-by-maxtech-international-inc-300016384.html.

4.19. SOFRADIR. // Электрон. дан.— Франция, 2015.— [Электронный ресурс] // URL: http://www.sofradir.com/technology/.

4.20. MCT, InGaAs, Pyroelectric, Thermopyle, Microbolometer), Application (People & Motion Sensing, Temperature Measurement, Fire & Gas Detection, Spectroscopy), Spectral Range (S/M/LWIR) & by Geography — Global Forecast to 2013 — 2020 // Электрон. Дан.— США, 2015.— [Электронный ресурс] // URL: http://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/ir-detector-market-161116561.html.

4.21. Uncooled Infrared Imaging Technology&Market Trends Report // Yole Development / Электрон. дан.— Франция, 2014.— [Электронный ресурс] // URL: http://www.yole.fr/ir-imaging.aspx#.VkHLPdLhDK8.

4.22. Infra-red imaging market: first smartphones and new low-cost cores widen commercial markets and pave the way for consumer applications — [Электронный ресурс] // URL: http://www.yole.fr/ir-imaging.aspx#

4.23. Terahertz Radiation Systems: Technologies and Global Markets. // Электрон. дан.— США, 2015.— [Электронный ресурс] // URL: http://www.bccresearch.com/market-research/instrumentation-and-sensors/terahertz-radiation-systems-technologies-global-markets-report-ias029d.html

4.24. Eisele, H. State of the art and future of electronic sources at terahertz frequencies / H. Eisele // Electronics Letters.— 2010.— v. 46.— P. s8–s11.

4.25. Long History with Optical Communications Industry — [Электронный ресурс] // URL: http://www.nec.com/en/global/prod/fod/

4.26. U. Madhow, Introduction to Communication Systems,/ U. Madhow // Cambridge University Press — 2014 — P. 525

4.27. Волоконно-оптическая техника: современное состояние и новые перспективы. 3-е изд., перераб. и доп. / Сб. стате под ред. Дмитриева С.А. и Слепова Н.Н. // М., Техносфера — 2010 — Р. 608.

4.28. F.Idachaba, D. U. Ike, O. Hope, Future Trends in Fiber Optics Communication Proceedings of the World Congress on Engineering 2014 / F. Idachaba, D. U. Ike, O. Hope // WCE 2014, July 2 — 4, London, U.K, — 2014 — Vol I.

4.29. Ogata Takaaki, Recent Status and Trends in Optical Submarine Cable Systems / O. Takaaki // NEC Technical Journal — 2010, Vol. 5 (1), pp. 4–7.

4.30. W. Miller, Emerging Cloud-Computing-Oriented Communications Architectures Drive New Fiber-Optic Communications Applications / W. Miller // Электрон. дан.— 2015 — [Электронный ресурс] // URL: http://eu.mouser.com/applications/communications-cloud-computing-architectures..

4.31. Introduction to Technological/Product Trends in Mitsubishi Electric High-frequency/Optical Devices — [Электронный ресурс] // URL: http://www.mitsubishielectric.com/semiconductors/triple_a_plus/technology/02/index5.html

4.32. Laser diod selection/ Электрон. дан.— Japan, 2014.— [Электронный ресурс] // URL: http://ldselection.com/tutorial/application-of-laser-diode/chapter5-application-of-laser-diode/.

4.33. G.Ghione, Semiconductor devices for high-speed optoelectronics/ G.Ghione // Cambridge University Press, UK — 2009.

4.34. Fiber optic communication: Key devices./ Edited by H. Venghars, N. Grote // Springer Series in Optical Science 161, USA — 2012.

4.35. Tamotsu Kimura, EML vs DML for Datacenter and Client Side Transceivers/ T. Kimura // Электрон. дан.— 2015.— [Электронный ресурс] // URL: http://blog.neophotonics.com/eml-vs-dml-for-data-center-and-client-side-transceivers

4.36. Petter Westbergh, Johan Gustavsson, Esa Haglund, and Anders Larsson, A high-speed laser for future data-communication links/ P. Westbergh, J. Gustavsson, E. Haglund, and A. Larsson/, Электрон. дан.— Göteborg, Sweden, 2009.— [Электронный ресурс] // URL: http://spie.org/newsroom/technical-articles-archive/1838-a-high-speed-laser-for-future-data-communication-links

4.37. Cedric Mayor, Testing analog high-speed circuit for optical networking — [Электронный ресурс] // URL: https://www.linkedin.com/pulse/testing-analog-high-speed-circuit-optical-networking-cedric-mayor

4.38. S. J. Sweeney, S. R. Jin, A comparison of the thermal stability of InGaAsP, AlGaInAs and GaInNAs quantum-well lasers for 1.3-μm operation/ S. J. Sweeney, S. R. Jin, R. Fehse, A. R. Adams, T. Higashi, H. Riechert, P. J. A. Tbijs // IEEE 18th International Semiconductor Laser Conference — 2002 — pp. 43–44.

4.39. MAO Yi-Wei, WANG Yao, CHEN Yang-Hua, Characteristic Optimization of 1.3 μm High-Speed MQW InGaAsP-AlGaInAs Lasers/ M. Yi-Wei, W. Yao, C. Yang-Hua, X. Zheng-Qun, L. Qi, D. Yan-Min, S. Hui // CHIN. PHYS. LETT.— 2012 — Vol. 29, No. 6, 064204

4.40. K. Otsubo, M. Matsuda, K. Takada, Uncooled 25 Gbit/s direct modulation of semi-insulating buried-heterostructure 1.3 μm AlGaInAs quantum-well DFB lasers/ K. Otsubo, M. Matsuda, K. Takada, S. Okumura, M. Ekawa, H. Tanaka, S. Ide, K. Mori, and T. Yamamoto // Electron. Lett.— 2008 — Vol. 44, no. 10, pp. 631–632.

4.41. T. Katsuyama, Development of Semiconductor Laser for Optical Communication, Sei technical review, 2009

4.42. 1550 nm WDM DFB lasers for direct digital modulation, // Электрон. дан.— JDS Uniphase, 2004.— [Электронный ресурс] // URL: https://www.usbid.com/assets/datasheets/0C/cqf915.pdf

4.43. Uncooled 2.5 Gbit/s direct modulation DFB laser for access network // Электрон. дан.— Nippon Telegraph and Telephone Corporation, 2006.— [Электронный ресурс] // URL: http://www.ntt.co.jp/dic/phlab/eng/theme/2006/e2006_01_03.pdf

4.44. 100°C 10-Gbit/s Directly Modulated InGaAsP DFB Lasers with Ru-doped Semi-insulating Buried Heterostructure //, Электрон. дан.— Nippon Telegraph and Telephone Corporation, 2007.— [Электронный ресурс] // URL: http://www.ntt.co.jp/dic/phlab/eng/theme/2007/e2007_03_02.pdf.

4.45. R. Paoletti, Semiconductor Lasers for High Bit Rate Optical Communication Networks/ R. Paoletti // Электрон. Дан.— Avago Technologies, 2009 — [Электронный ресурс] // URL: http://leos.unipv.it/slides/lecture/TTC_avago_scd_laser_devices_2009_paoletti_lect_pavia_public.pdf

4.46. Electroasorption-modulated DFB laser ready to attack 10 Gbit/s market — [Электронный ресурс] // URL: http://www.oocities.org/electroabsorption/eam/eml-alcatel.pdf

4.47. Wataru Kobayashi, Naoki Fujiwara, Takashi Tadokoro, and Fumiyoshi Kano, Uncooled Operation of 10-/40-Gbit/s 1.55-μm Electroabsorption Modulator Integrated with Distributed Feedback Laser / W. Kobayashi, N. Fujiwara, T. Tadokoro, and F. Kano // NTT Technical Review — 2010 — Vol. 8.— No. 8.— pp. 1–8.

4.48. Fujisawa T., Fujiwara N., Tadokoro T., Kano F. 40-km Single-mode-fiber Transmission for 100-Gbit/s Ethernet System Based on 25-Gbit/s 1.3--μm Electroabsorption Modulator Integrated with Distributed Feedback Laser — [Электронный ресурс] // URL: https://www.ntt-review.jp/archive/ntttechnical.php?contents=ntr201008le1.html

4.49. K. Nakahara, T. Tsuchiya, E. Nomoto, and M. Mukaikubo, Transmission Properties of 1.3-μm InGaAlAs MQW FP Lasers in 10-Gb/s Uncooled Operation / K. Nakahara, T. Tsuchiya, E. Nomoto, and M. Mukaikubo // JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY — 2005 — Vol. 23, No. 12, pp. 3997–4002.

4.50. R. Paoletti, M. Agresti, D. Bertone, Highly Reliable and High-Yield 1300-nm InGaAlAs Directly Modulated Ridge Fabry-Pйrot Lasers, Operating at 10-Gb/s, up to 110° C, With Constant Current Swing / R. Paoletti, M. Agresti, D. Bertone, L. Bianco, C. Bruschi, A. Buccieri, R. Campi, C. Dorigoni, P. Gotta, M. Liotti, G. Magnetti, P. Montangero, G. Morello, C. Rigo, E. Riva, G. Rossi, D. Soderstrom, A. Stano, P. Valenti, M. Vallone, and M. Meliga // JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY — 2006 — Vol. 24, NO. 1, pp. 143–149.

4.51. V. M. Ustinov, A. E. Zhukov, GaAs-based long-wavelength lasers / V. M. Ustinov, A. E. Zhukov / Semicond. Sci. Technol.— 2000 — 15, p41–p54.

4.52. Henning Riechert, Arun Ramakrishnan and Gunther Steinle, Development of InGaAsN-based 1.3-μm VCSELs / H. Riechert, Ar. Ramakrishnan and G. Steinle // Semiconductor Science and Technology — 2002 — Volume 17, Number 8, pp. 892–897.

4.53. J. S. Wang, R. S. Hsiao, G. Lin, K. F. Lin, H. Y. Liu, C. M. Lai, L. Wei, C. Y. Liang, J. Y. Chi, A. R. Kovsh, N.A.Maleev, D. A. Livshits, J. F. Chen, H. C. Yu, and V. M. Ustinov, Molecular-beam-epitaxy growth of high-quality In Ga As N Ga As quantum well lasers emitting at 1.3-μm / J. S. Wang, R. S. Hsiao, G. Lin, K. F. Lin, H. Y. Liu, C. M. Lai, L. Wei, C. Y. Liang, J. Y. Chi, A. R. Kovsh, N.A.Maleev, D. A. Livshits, J. F. Chen, H. C. Yu, and V. M. Ustinov // Journal of Vacuum Science & Technology — 2004 — B 22, 2663-2667; doi: 10.1116/1.1807839.

4.54. V. M. Ustinov, A. E. Zhukov, A. Y. Egorov and N. A. Maleev, Quantum dot lasers / V.M. Ustinov, A.E. Zhukov, A.Y. Egorov and N. A. Maleev // UK, Oxford University Press — 2003.

4.55. V. M. Ustinov, N. A. Maleev, A. E. Zhukov, A. R. Kovsh, A. Yu. Egorov, A. V. Lunev, B. V. Volovik, I. L. Krestnikov, Yu. G. Musikhin, N. A. Bert, P. S. Kop'ev, Zh. I. Alferov, N. N. Ledentsov and D. Bimberg, InAs/InGaAs quantum dot structures on GaAs substrates emitting at 1.3-μm / V. M. Ustinov, N. A. Maleev, A. E. Zhukov, A. R. Kovsh, A. Yu. Egorov, A. V. Lunev, B. V. Volovik, I. L. Krestnikov, Yu. G. Musikhin, N. A. Bert, P. S. Kop'ev, Zh. I. Alferov, N. N. Ledentsov and D. Bimberg / Appl. Phys. Lett.— 1999 — Vol. 74, No. 19, pp. 2815–2817.

4.56. J. A. Lott, N. N. Ledentsov, V. M. Ustinov, N. A. Maleev, A. E. Zhukov, A. R. Kovsh, M. V. Maximov, B. V. Volovik, Zh. I. Alferov, and D. Bimberg, InAs-InGaAs quantum dot VCSELs on GaAs substrates emitting at 1.3-μm / J. A. Lott, N. N. Ledentsov, V. M. Ustinov, N. A. Maleev, A. E. Zhukov, A. R. Kovsh, M. V. Maximov, B. V. Volovik, Zh. I. Alferov, and D. Bimberg //, Electron. Lett.— 2000 — 36(16), 1384–1385.

4.57. Innolume GmbH, [сайт] // URL: http://www.innolume.com

4.58. GDLaser, Inc, [сайт] // URL: http: //www.qdlaser.com

4.59. Y. Tanaka, M. Ishida, K. Takada, T. Yamamoto, Hai-zhi Song, Y. Nakata, M. Yamaguchi, K. Nishi, M. Sugawara, Y. Arakawa, 25 Gbps direct modulation in 1.3-μm InAs/GaAs high-density quantum dot lasers/ Y. Tanaka, M. Ishida, K. Takada, T. Yamamoto, Hai-zhi Song, Y. Nakata, M. Yamaguchi, K. Nishi, M. Sugawara, Y. Arakawa // Conference on Lasers and Electro-Optics San Jose, CA — May 16, 2010.

4.60. VCSELs: fundamentals, technology and applications of vertical-cavity surface-emitting lasers, ed. by. R. Michalzik/ R. Michalzik // Springer Series in Optical Sciences, USA — 2013.

4.61. Wafer-fused VCSELs shape up for enterprise applications/, Электрон. дан.— COMPOUND SEMICONDUCTOR JANUARY/FEBRUARY 2005 pp. 25–27, 2005.— [Электронный ресурс] // URL: http://www.beamexpress.com/images/pdf/Compound_SemiJanKAPON.pdf.

4.62. Ferrara J, Yang W, Zhu L, Qiao P, Chang-Hasnain C.J. Heterogeneously integrated long-wavelength VCSEL using silicon high contrast grating on an SOI substrate/ Ferrara J, Yang W, Zhu L, Qiao P, Chang-Hasnain C.J. // Opt Express. Feb 9 — 2015 — 23(3):2512-23.

4.63. Photonics technology and instrumentation / Ed by D. L. Andrews // USA, Wiley — 2015 — 518 p. ISBN 978-1-118-22554-7.

4.64. Fiber Optic Detectors // Электрон. Дан.— Fiber-Optics, 2009 — [Электронный ресурс] // URL: http://www.fiber-optics.info/articles/fiber_optic_detectors.

4.65. Chuan XIE, Jiaxi KAN, Shenghong HUANG, Li WANG, Neinyi LI, Chan Chih CHEN and Shigeru INANO, 850 nm VCSEL and PD for Ultra High Speed Data Communication over Multimode Fiber / C. XIE, J. KAN, S. HUANG, L. WANG, N. LI, C. C. CHEN and S. INANO // SEI TECHNICAL REVIEW — 2013 — Num 77.— pp. 69–73.

4.66. 35 GHz Single High-speed Photodetector // Электрон. Дан.— Finisar Corp. — [Электронный ресурс] // URL:https://www.finisar.com/optical-components/mpdv1120ra.

4.67. Mohd Azlishah Othman, Siti Nabilah Taib, Mohd Nor Husain and Zul Atfyi Fauzan Mohammed Napiah, Reviews On Avalanche Photodiode For Optical Communication Technology / M. A. Othman, S. N. Taib, M. N. Husain and Z. A. Fauzan M. Napiah // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences — 2014 — Vol. 9, No. 1, pp. 35–44.

4.68. M. Nada, Y. Muramoto, H. Yokoyama, T. Ishibashi, and S. Kodama, InAlAs APD with high multiplied responsivity-bandwidth product (MR-bandwidth product) of 168 A/W•GHz for 25 Gbit/s high-speed operations/ M. Nada, Y. Muramoto, H. Yokoyama, T. Ishibashi, and S. Kodama // Electron. Lett.— 2012 — Vol. 46, pp. 397–399.

4.69. T. Ishibashi and H. Ito, Uni-traveling-carrier photodiodes / T. Ishibashi and H. Ito // Tech. Dig. Ultrafast Electronics and Optoelectronics, Lake Tahoe, CA, USA — 1997 — pp. 83–87.

4.70. A. Wakatsuki, Y. Muramoto, and T. Ishibashi, Development of Terahertz — wave Photomixer Module Using a Uni-traveling-carrier Photodiode/ A. Wakatsuki, Y. Muramoto, and T. Ishibashi // Электрон. дан.— NTT Technical Review, 2012 — v. 10 n 2.— [Электронный ресурс] //URL: https://www.ntt-review.jp/archive/ntttechnical.php?-contents=ntr201202fa5.html.

4.71. «The Worldwide Market for Lasers. Market Review and Forecast 2016», подготовленном компанией Strategies Unlimited (США) // Электрон. дан.— [Электронный ресурс] // URL: http://store.strategies-u.com/the-worldwide-market-for-lasers-market-review-and-forecast-2016/

4.72. Nanotechnology Research Directions for Societal Needs in 2020 — Retrospective and Outlook — PRELIMINARY COPY — October 2010 / Editors Mihail C. Roco, Chad A. Mirkin, Mark C. Hersam // The National Science Foundation (NSF) under a cooperative agreement from NSF (ENG-0844639) to the World Technology Evaluation Center, Inc. “Nanophotonics” chapter by E. L. Hu, M. Brongersma, A. Baca, and M. Lipson.

4.73. Tang, L. Nanometer-scale germanium photodetector enhanced by a near-infrared dipole antenna/ L. Tang, S. E. Kocabas, S. Latif, A.K. Okyay, D.-S. Ly-Gagnon, K.C. Saraswat, and D. A. B. Miller // Nat. Photonics — 2008 — Vol. 2 — pp. 226–229.

4.74. Gramotnev D. K. Plasmonics beyond the diffraction limit/ D. K. Gramotnev and S. I. Bozhevolnyi // Nat. Phot.— 2010 — vol. 8 — p.83.

4.75. Akimov, A.M. Generation of single optical plasmons in metallic nanowired coupled to quantum dots/ A. M. Akimov, A. Mukherjee, C. L. Yu, D. E. Chang, A. S. Zibrov, P. R. Hemmer, H. Park, and M. D. Lukin // Nature — 2007 — vol.450 — pp.402–406.

4.76. Hryciw, A. J. Electrifying plasmonics on silicon / Hryciw, A. J., Y. C. Jun, M. L. Brongersma // Nat. Mater.— 2010 — vol. 9 — pp. 3–4.

4.77. Bergman, D. S. Surface plasmon amplification by stimulated emission of radiation / D. S. Bergman and M. I. Stockman // Phys. Rev. Lett.— 2003 — vol. 90, p. 027402.

4.78. Hill, M. T. Lasing in metallic coated nanocavities / M. T. Hill, Y.-S. Oei, B. Smalbrugge, Y. Zhu, T. de Vries, P. J. van Veldhoven, F. W. M. van Otten, T. J. Eijkemans, J. P. Turkiewicz, H. de Waardt, E. J. Geluk, S.-H. Kwon, Y.-H. Lee, R. Nötzel, and M. K. Smit // Nat. Photonics — 2007 — vol. 1 — pp. 589–594.

4.79. Noginov, M. Z. Demonstration of a spaser-based nanolaser / Noginov, M. Z., G. Zhu, A. M. Belgrave, R. Bakker, V.M. Shalaev, E. E. Narimanov, S. Stout, E. Herz, T. Suteewong, and U. Wiesner // Nature -2009-vol.460 — pp. 1110–1112.

4.80. Oulton, R. F. Plasmon lasers at deep subwavelength scale / Oulton, R. F., V. J. Sorger, T. Zentgraf, R.-M. Ma, C. Gladden, L. Dai, G. Bartal, and X. Zhang // Nature — 2009 — vol. 461 — pp. 629–632.

4.81. Service, R. F. Ever-smaller lasers pave the way for data highways made of light / R. F. Service // Science -2010 — vol. 328 — p. 810.

4.82. Sun, C. Single-chip microprocessor that communicates directly using light / C. Sun, M. T. Wade, Y. Lee, J. S. Orcutt, L. Alloatti, M. S. Georgas, A. S. Waterman, J. M. Shainline, R. R. Avizienis, S. Lin, B. R. Moss, R. Kumar, F. Pavanello, A. H. Atabaki, H. M. Cook, A. J. Ou1, J. C. Leu, Y.-H. Chen, K. Asanović, R. J. Ram, M. A. Popović, V. M. Stojanović // Nature-2015-vo l. 5 2 8 (2 4) — pp. 534–538.

4.83. Bergaman, K. Optical interconnects and extreme computing/ K. Bergman, J. Shalf and T. Hausken // Optics and Photonics News — 2016-04 — pp. 32–39.

4.84. Mounier, E. A view on the Silicon Photonics market / E. Mounier, C. Troadec // Yole Development-2014,— pp. 1–247

4.85. Foster, M. Silicon-chip-based ultrafast optical oscilloscope/ M. Foster, R., Salem, D. Geraghty, A. Turner-Foster, M. Lipson, and A. Gaeta // Nature -2008 — vol. 456 — pp. 81–84.

4.86. Levy, J. CMOS-compatible multiple-wavelength oscillator for on-chip optical interconnects / J. Levy, A. Gondarenko, M. Foster, A. Gaeta, and M. Lipson // Nat. Photonics — 2009 — vol. 4 — pp. 37–40.

4.87. Luo, L.-W. WDM-compatible mode-division multiplexing on a silicon chip/ L.-W. Luo, N. Ophir, C. P. Chen, L. Gabrielli, C. B. Poitras, K. Bergman, M. Lipson // Nat. Comm.-2014 — vol. 5 — pp. 3069.

4.88. Miller, D. A. B., Rationale and Challenges for Optical Interconnects to Electronic Chips/ D. A. B. Miller // Proc. IEEE -2000 — vol. 88.— No. 6.

4.89. Goodman, J. W. Optical interconnections for VLSI systems/ J.W. Goodman, F. J. Leonberger, S.-Y.Kung, and R. A. Athale // Proc. IEEE -1984 — vol. 72, pp. 850–866.

4.90. HP labs — [сайт] // URL:http://www.hpl.hp.com/.

4.91. Miller, D. A. B., Are optical transistors the logical next step?/ D. A. B. Miller // Nat. Phot. -2010 — vol.4 — pp. 1–5.

4.92. Fushman, I. Controlled Phase Shifts with a Single Quantum Dot/ I. Fushman, D. Englund, A. Faraon, N. Stoltz, P. Petroff, J. Vučković // Science -2008 — vol. 320 (5877) — pp. 769–772.

4.93. Lindenmann, N. Photonic wire bonding: a novel concept for chip scale interconnects/ N. Lindenmann, G. Balthasar, D. Hillerkuss, R. Schmogrow, M. Jordan, J. Leuthold, W. Freude, and C. Koos // Opt. Exp.— 2012 — vol. 20(16) — p. 17667.

4.94. Li, D. Electric Spaser in the Extreme Quantum Limit/ D. Li and M. I. Stockman // Phys. Rev. Lett.— 2013 — vol. 110 — p. 106803.

4.95. Lu, Y.-J. All-Color Plasmonic Nanolasers with Ultralow Thresholds: Autotuning Mechanism for Single-Mode Lasing / Y.-J. Lu, C.-Y. Wang, J. Kim, H.-Y. Chen, M.-Y. Lu, Y.-C. Chen, W.-H. Cang, L.-J. Chen, M. I. Stockman, C.-K. Shih, and S. Gwo // Nano Lett.— 2014 — dx.doi.org/10.1021/nl501273u.

4.96. A. Giugni, A. Hot-electron nanoscopy using adiabatic compression of surface plasmons / A. Giugni, B. Torre, A. Toma, M. Francardi, M. Malerba, A. Alabastri1, R. Proietti Zaccaria, M. I. Stockman and E. Di Fabrizio // Nat. Nanotech.— 2013 — DOI: 10.1038/NNANO.2013.207.

4.97. Schares, L. Terabus: Terabit/Second-Class Card-Level Optical Interconnect Technologies / L. Schares, J. A. Kash, F. E. Doany, C. L. Schow, C. Schuster, D. M. Kuchta, P. K. Pepeljugoski, J. M. Trewhella, C. W. Baks, R. A. John, L.Shan, Y. H. Kwark, R. A. Budd, P. Chiniwalla, F. R. Libsch, J. Rosner, C. K. Tsang, C. S. Patel, J. D. Schaub, R. Dangel, F. Horst, B. J. Offrein, D. Kucharski, D. Guckenberger, S. Hegde, H. Nyikal, C.-K. Lin, A. Tandon, G. R. Trott, M.Nystrom, D. P. Bour, M. R. T. Tan, and D. W. Dolfi // IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronics — 2006 — vol. 12(5) — pp. 1032–1044.

4.98. Schow, C. L. A 24-Channel, 300 Gb/s, 8.2 pJ/bit, Full-Duplex. Fiber-Coupled Optical Transceiver Module Based on a Single “Holey” CMOS IC/ C. L. Schow, F. E. Doany, A. V. Rylyakov, B. G. Lee, C. V. Jahnes, Y. H. Kwark, C. W. Baks, D. M. Kuchta, and J. A. Kash // J. of Lightwave Technology -2011 — vol.29 (4) — pp. 542–553.

4.99. Niccolai J. Prototype of HP’s futuristic “Machine” coming next year — [Электронный ресурс] // URL:http://www.pcworld.com/article/2931352/prototype-of-hps-futuristic-machine-coming-next-year.html

4.100. Vance A. With “The Machine” HP May Have Invented a New Kind of Computer — [Электронный ресурс] // URL: http://www.bloomberg.com/news/articles/2014-06-12/with-the-machine-hp-may-have-invented-a-new-kind-of-computer

4.101. ADVA Optical Networking Launches MicroMux Module for Ultimate DCI Scalability — [Электронный ресурс] // URL: http://www.advaoptical.com/en/newsroom/press-releases-english/20160321-adva-optical-networking-launches-micromux-module-for-ultimate-dci-scalability

4.102. HP labs Palj Alto, USA — [сайт] // URL:http://www.hpl.hp.com/palo_alto/

4.103. Старцев, Ю. К. Исследования стекла в России / Ю. К. Старцев // Изд. СпбГТИ (ТУ), — 2009.— 309 с.

4.104. Starodubov, D. ZBLAN Fibers: From Zero Gravity Tests to Orbital Manufacturing / D. Starodubov, S. Mechery, D. Miller, C. Ulmer, P. Willems, J. Ganley, D. Tucker // Imaging and Applied Optics.— 2014.

4.105. Асеев, В. А. Спектрально-люминесцентные свойства фото-термо-рефрактивных наностеклокерамик, активированных ионами иттербия и эрбия / В. А. Асеев, Н. В. Никоноров // Оптический журнал.— 2008. Т. 75.— №12.— С. 81–88.

4.106. Aseev, V. Holographic optical elements and devices based on polyfunctional photo-thermo-refractive glass / V. Aseev, N. Nikonorov // Proceeding of SPIE.— 2009.— v. 7506.— P. K1–9.

4.107. Никоноров, Н.В. Оптическая полифункциональная нано-стеклокерамика / Н.В. Никоноров // Белая книга «Исследования в области наночастиц, наноструктур и нанокомпозитов в Российской Федерации».— М.: Изд. Совета Федерации Федерального собрания РФ, — 2006.— С. 163–164.

4.108. Nikonorov, N. New polyfunctional photo-thermo-refractive glasses for photonics applications / N. Nikonorov, V. Aseev, A. Ignatiev, A. Zlatov // Technical Digest of 7th International Conference on Optics-photonics Design & Fabrication (ODF'10).— 2010.— P. 209–210.

4.109. Светодиодные технологии: тенденции рынка в России и в мире.— 2015. [Электронный ресурс] // URL: http://www.elec.ru/articles/svetodiodnye-tekhnologii-tendentsii-rynka-v-rossii/

4.110. Zhang, R. A new-generation color converter for high-power white LED: transparent Ce3+: YAG phosphor-in-glass / R. Zhang, et al. // Laser & Photonics Reviews.— 2014.— v. 8.— №1.— P. 158–164.

4.111. Cui, Z. Eu 2+/Sm 3+ ions co-doped white light luminescence SrSiO 3 glass-ceramics phosphor for white LED / Z. Cui, et al. // Journal of Alloys and Compounds.— 2011.— v. 509.— №8.— P. 3553–3558.

4.112. SEMI: China's LED Fab Industry Will Install More than 1,000 MOCVD Tools from 2014 to 2018. [Электронный ресурс] // URL: http://www.semi.org/en/node/51891

4.113. Touch Display Research. [сайт] // URL: http://touchdisplayresearch.com/?cat=3

4.114. P. Avouris, Z. Chen, V. Perebeinos, Nature Nano 2, 60 (2007).

4.115. F. H. L. Koppens, T. Mueller, Ph. Avouris, A. C. Ferrari, M. S. Vitiello, and M. Polini, Nat. Nanotechnol. 9, 780 (2014).

4.116. M. Liu, X. Yin, E. Ulin-Avila, B. Geng, T. Zentgraf, L. Ju, F. Wang, and X. Zhang, Nature 474, 64 (2011).

4.117. B. Radisavljevic, A. Radenovic, J. Brivio, V. Giacometti, and A. Kis, Nat. Nanotechnol. 6, 147 (2011).

4.118. A. Pospischil, M. M. Furchi, and T. Mueller, Nat. Nanotechnol. 9, 257 (2014).

4.119. M. M. Furchi, A. Pospischil, F. Libisch, J. Burgdцrfer, and T. Mueller, Nano Lett. 14, 4785 (2014).

4.120. K. F. Mak, C. Lee, J. Hone, J. Shan, and T. F. Heinz, Phys. Rev. Lett. 105, 136805 (2010).

4.121. K. F. Mak, K. He, J. Shan, and T. F. Heinz, Nat. Nanotechnol. 7, 494 (2012).

4.122. Mak, K. F. Sfeir, M. Y. Wu, Y. Lui, C. H. Misewich, J. Heinz, T. F. Phys. Rev. Lett. 101, 196405 (2008).

4.123. Ming Liu, Xiaobo Yin, Erick Ulin-Avila, Baisong Geng, Thomas Zentgraf, Long Ju, Feng Wang, Xiang Zhang, Nature 474, 64 (2011).

4.124. Feng Wang, Yuanbo Zhang, Chuanshan Tian, Caglar Girit, Alex Zettl, Michael Crommie, Y. Ron Shen, Science, 320, 206 (2008).

4.125. F. Xia, T. Mueller, Y. -M. Lin, A. Valdes-Garcia, P. Avouris, Nat. Nanotechnol. 4, 839 (2009).

4.126. M. Liu, X. Yin, E. Ulin-Avila, B. Geng, T. Zentgraf, L. Ju, F. Wang, X. Zhang, Nature 64, 474 (2011).

4.127. M. Liu, X. Yin, X. Zhang, Nano Lett. 12, 1482 (2012).

4.128. Yuanda Gao, Ren-Jye Shiue, Xuetao Gan, Luozhou Li, Cheng Peng, Inanc Meric, Lei Wang, Attila Szep, Dennis Walker, James Hone, and Dirk Englund, Nano Lett. 15, 2001 (2015).

4.129. F. Xia, T. Mueller, Y. Lin, A. Valdes-Garcia, and Ph. Avouris, Nat. Nanotechnol. 4, 839 (2009).

4.130. T. Mueller, F. Xia, and Ph. Avouris, Nat. Photon. 4, 297 (2010).

4.131. Lemme, M. C. et al. Gate-activated photoresponse in a graphene p-n junction. Nano Lett. 11, 4134-4137 (2011).

4.132. Gabor, N. M. et al. Hot carrier-assisted intrinsic photoresponse in graphene. Science 334, 648-52 (2011).

4.133. Freitag, M., Low, T. & Avouris, P. Increased responsivity of suspended graphene photodetectors. Nano Lett. 13, 1644–1648 (2013).

4.134. Gan, X. et al. Chip-integrated ultrafast graphene photodetector with high responsivity. Nature Photon. 7, 883–887 (2013).

4.135. Pospischil, A. et al. CMOS-compatible graphene photodetector covering all optical communication bands. Nature Photon. 7, 892–896 (2013).

4.136. Wang, X., Cheng, Z., Xu, K., Tsang, H. K. & Xu, J. High-responsivity graphene/silicon-heterostructure waveguide photodetectors. Nature Photon. 7, 888-891 (2013).

4.137. An, X., Liu, F., Jung, Y. J. & Kar, S. Tunable graphene-silicon heterojunctions for ultrasensitive photodetection. Nano Lett. 13, 909–916 (2013).

4.138. Freitag, M., Low, T., Xia, F. & Avouris, P. Photoconductivity of biased graphene. Nature Photon. 7, 53–59 (2012).

4.139. Yan, J. et al. Dual-gated bilayer graphene hot-electron bolometer. Nature Nanotech. 7, 472-478 (2012).

4.140. Konstantatos, G. et al. Hybrid graphene-quantum dot phototransistors with ultrahigh gain. Nature Nanotech. 7, 363–368 (2012).

4.141. Spirito, D. et al. High performance bilayer-graphene terahertz detectors. Appl. Phys. Lett. 104, 061111 (2014).

4.142. Mittendorff, M. et al. Ultrafast graphene-based broadband THz detector. Appl. Phys. Lett. 103, 021113 (2013).

4.143. Britnell, L. et al. Strong light-matter interactions in heterostructures of atomically thin films. Science 340, 1311–1314 (2013).

4.144. Yu, W. J. et al. Highly efficient gate-tunable photocurrent generation in vertical heterostructures of layered materials. Nature Nanotech. 8, 952–958 (2013).

4.145. Lopez-Sanchez, O., Lembke, D., Kayci, M., Radenovic, A. & Kis, A. Ultrasensitive photodetectors based on monolayer MoS2. Nature Nanotech. 8, 497–501 (2013).

4.146. Liu, C-H., Chang, Y., Norris, T. B. & Zhong, Z. Graphene photodetectors with ultra-broadband and high responsivity at room temperature. Nature Nanotech. 9, 273-278 (2014).

4.147. Baugher, B. W. H., Churchill, H. O. H., Yang, Y. & Jarillo-Herrero, P. Optoelectronic devices based on electrically tunable p-n diodes in a monolayer dichalcogenide. Nature Nanotech. 9, 262–267 (2014).

4.148. Ross, J. S. et al. Electrically tunable excitonic light-emitting diodes based on monolayer WSe2 p-n junctions. Nature Nanotech. 9, 268–272 (2014).

4.149. Hu, P. et al. Highly responsive ultrathin GaS nanosheet photodetectors on rigid and flexible substrates. Nano Lett. 13, 1649–1654 (2013).

4.150. M. Furchi, A. Urich, A. Pospischil, G. Lilley, K. Unterrainer, H. Detz, P. Klang, A. M. Andrews, W. Schrenk, G. Strasser, and T. Mueller, Nano Lett. 12, 2773 (2012).

4.151. Sukang Bae, Hyeongkeun Kim, Youngbin Lee, et al, “Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes,” Nature Nanotech. 5, 574–578 (2010).

4.152. Z. Tehrani, G. Burwell, M. A. Mohd Azmi, et al “Generic epitaxial graphene biosensors for ultrasensitive detection of cancer risk biomarker,” 2D Materials, 1, 025004 (2014)

4.153. Berciaud, S. et al. “Electron and optical phonon temperatures in electrically biased graphene.” Phys. Rev. Lett. 104, 227401 (2010).

4.154. Freitag, M., Chiu, H-Y., Steiner, M., Perebeinos, V. & Avouris, P. “Thermal infrared emission from biased graphene.” Nature Nanotech. 5, 497 (2010).

4.155. Y. D Kim, et al. “Bright visible light emission from graphene” Nature Nano. 10, 676 (2015).

4.156. Lounis, B. & Moerner, W. E. Single photons on demand from a single molecule at room temperature. Nature 407, 491 (2000).

4.157. Dousse, A. et al. Ultrabright source of entangled photon pairs. Nature 466, 217 (2010).

4.158. Mizuochi, N. et al. Electrically driven single-photon source at room temperature in diamond. Nat. Photonics 6, 299 (2012).

4.159. Högele, A., Galland, C., Winger, M. & Imamoğlu, A. Photon antibunching in the photoluminescence spectra of a single carbon nanotube. Physical Review Letters 100, 217401 (2008).

4.160. Srivastava, A. et al. Nature Nano. 10, 491 (2015).

4.161. He, Y.-M. et al. Nature Nano. 10, 497 (2015).

4.162. Koperski, M. et al. Nature Nano. 10, 503 (2015).

4.163. Chakraborty, C., Kinnischtzke, L., Goodfellow, K. M., Beams, R. & Vamivakas, A. N. Nature Nano. 10, 507 (2015).

4.164. Perebeinos V., Nature Nano. 10, 485 (2015).

4.165. J. Weertman и W. P. Murphy, «The evolution of the materials science profession and professional over the past 50 years», J. Miner. Met. Mater. Soc., т. 59, вып. 2, сс. 18–19, 2007.

4.166. S. Iijima, «Helical microtubules of graphitic carbon», Nature, т. 354, вып. 6348, сс. 56–58, ноя. 1991.

4.167. S. Iijima и T. Ichihashi, «Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter», Nature, т. 363, вып. 6430, сс. 603–605, июн. 1993.

4.168. D. S. Bethune, C. H. Klang, M. S. de Vries, G. Gorman, R. Savoy, J. Vazquez, и R. Beyers, «Cobalt-catalysed growth of carbon nanotubes with single-atomic-layer walls», Nature, т. 363, вып. 6430, сс. 605–607, июн. 1993.

4.169. R. Saito, G. Dresselhaus, и M. S. Dresselhaus, Physical Properties of Carbon Nanotubes. Imperial College Press, 1998.

4.170. J. H. L. Watson и K. Kaufmann, «Electron Microscope Examination of the Microphysical Properties of the Polymer Cuprene», J. Appl. Phys., т. 17, вып. 12, 1946.

4.171. Л. В. Радушкевич и В. М. Лукьянович, «О структуре углерода, образующего-ся при термическом разложении окиси углерода на железном контакте», Журн. физ. химии, т. 26, вып. 1, сс. 88–95, 1952.

4.172. R. Bacon, «Growth, structure, and properties of graphite whiskers», J. Appl. Phys., т. 31, вып. 2, сс. 283–290, 1960.

4.173. Д. А. Бочвар и Е. Г. Гальперин, «О гипотетических системах: карбододекаэдре, s-икосаэдране и карбо-s-икосаэдре», Докл. АН СССР, т. 209, вып. 3, сс. 610–612, 1973.

4.174. R. T. K. Baker и R. J. Waite, «Formation of carbonaceous deposits from the platinum-iron catalyzed decomposition of acetylene», J. Catal., т. 37, вып. 1, сс. 101–105, апр. 1975.

4.175. A. Oberlin, M. Endo, и T. Koyama, «High resolution electron microscope observations of graphitized carbon fibers», Carbon N. Y., т. 14, вып. 2, сс. 133–135, 1976.

4.176. M. Audier, A. Oberlin, и M. Coulon, «Crystallographic orientations of catalytic particles in filamentous carbon; Case of simple conical particles», J. Cryst. Growth, т. 55, вып. 3, сс. 549–556, дек. 1981.

4.177. А. М. Нестеренко, Н. Ф. Колесник, Ю. С. Ахматов, В. Н. Сухомлин, и О. В. Прилуцкий, «Особенности фазового состава и структуры продуктов взаимо-действия NiO и Fe2O3 с окисью углерода», Известия АН СССР, Серия Металлы, вып. 3, сс. 12–17, 1982.

4.178. G. G. Tibbetts, «Why are carbon filaments tubular? », J. Cryst. Growth, т. 66, вып. 3, сс. 632–638, 1984.

4.179. М. Ю. Корнилов, «Нужен трубчатый углерод», Химия и жизнь, т. 8, сс. 22–23, 1985.

4.180. A. Sacco, P. Thacker, T. N. Chang, и A. T. S. Chiang, «The initiation and growth of filamentous carbon from α-iron in H2, CH4, H2O, CO2, and CO gas mixtures», J. Catal., т. 85, вып. 1, сс. 224–236, 1984.

4.181. M. Endo, «Grow carbon fibers in the vapor phase», Chemtech, т. 18, вып. 9, сс. 568–576, 1988.

4.182. M. S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, и P. C. Eklund, Science of fullerenes and carbon nanotubes: their properties and applications. Academic press, 1996.

4.183. S. Reich, C. Thomsen, и J. Maultzsch, Carbon nanotubes: basic concepts and physical properties. John Wiley & Sons, 2008.

4.184. S. V Rotkin и S. Subramoney, Applied physics of carbon nanotubes: fundamentals of theory, optics and transport devices. Springer Science & Business Media, 2006.

4.185. M.-F. Yu, B. S. Files, S. Arepalli, и R. S. Ruoff, «Tensile loading of ropes of single wall carbon nanotubes and their mechanical properties», Phys. Rev. Lett., т. 84, вып. 24, с. 5552, 2000.

4.186. A. K.-T. Lau и D. Hui, «The revolutionary creation of new advanced materials — carbon nanotube composites», Compos. Part B Eng., т. 33, вып. 4, сс. 263-277, 2002.

4.187. T. Chatterjee, C. A. Mitchell, V. G. Hadjiev, и R. Krishnamoorti, «Hierarchical polymer-nanotube composites», Adv. Mater., т. 19, вып. 22, сс. 3850–3853, 2007.

4.188. P. Calvert, «Nanotube composites: a recipe for strength», Nature, т. 399, вып. 6733, сс. 210–211, 1999.

4.189. M. T. Byrne и Y. K. Gun'ko, «Recent advances in research on carbon nanotube-polymer composites», Adv. Mater., т. 22, вып. 15, сс. 1672–88, апр. 2010.

4.190. N.-H. Tai, M.-K. Yeh, и T.-H. Peng, «Experimental study and theoretical analysis on the mechanical properties of SWNTs/phenolic composites», Compos. Part B Eng., т. 39, вып. 6, сс. 926-932, сен. 2008.

4.191. Z. Spitalsky, D. Tasis, K. Papagelis, и C. Galiotis, «Carbon nanotube-polymer composites: Chemistry, processing, mechanical and electrical properties», Prog. Polym. Sci., т. 35, вып. 3, сс. 357–401, мар. 2010.

4.192. P. Avouris, M. Freitag, и V. Perebeinos, «Carbon-Nanotube Optoelectronics», Physics (College. Park. Md), т. 454, сс. 423–454, 2008.

4.193. P. Avouris, M. Freitag, и V. Perebeinos, «Carbon-nanotube photonics and optoelectronics», Nat. Photonics, т. 2, вып. 6, сс. 341–350, 2008.

4.194. D. Jariwala, V. K. Sangwan, L. J. Lauhon, T. J. Marks, и M. C. Hersam, «Carbon nanomaterials for electronics, optoelectronics, photovoltaics, and sensing», Chem. Soc. Rev., т. 42, вып. 7, сс. 2824-2860, 2013.

4.195. J. Zhou, N. Li, F. Gao, Y. Zhao, L. Hou, и Z. Xu, «Vertically-aligned BCN Nanotube Arrays with Superior Performance in Electrochemical capacitors», Sci. Rep., т. 4, с. 6083, авг. 2014.

4.196. X. Li и X. Wu, «Low-dimensional boron nitride nanomaterials», J. Univ. Sci. Technol. China, т. 44, вып. 5, сс. 389–402, 2014.

4.197. A. Fathalizadeh, T. Pham, W. Mickelson, и A. Zettl, «Scaled synthesis of boron nitride nanotubes, nanoribbons, and nanococoons using direct feedstock injection into an extended-pressure, inductively-coupled thermal plasma», Nano Lett., т. 14, вып. 8, сс. 4881–4886, 2014.

4.198. N. G. Chopra, R. J. Luyken, K. Cherrey, V. H. Crespi, M. L. Cohen, S. G. Louie, и A. Zettl, «Boron Nitride Nanotubes», Science, т. 269, вып. 5226, сс. 966–967, авг. 1995.

4.199. J. Goldberger, R. He, Y. Zhang, и S. Lee, «Single-crystal gallium nitride nanotubes», Nature, т. 422, вып. April, сс. 599–602, 2003.

4.200. R. Tenne, «Advances in the synthesis of inorganic nanotubes and fullerene — like nanoparticles», Angew. Chemie-International Ed., т. 42, вып. 42, сс. 5124–5132, 2003.

4.201. J. Goldberger, R. Fan, и P. Yang, «Inorganic nanotubes: A novel platform for nanofluidics», Acc. Chem. Res., т. 39, вып. 4, сс. 239–248, 2006.

4.202. R. Tenne, «Inorganic nanotubes and fullerene-like materials», Chem.— A Eur. J., т. 8, вып. 23, сс. 5296–5304, 2002.

4.203. J. Sha, J. Niu, X. Ma, J. Xu, X. Zhang, Q. Yang, и D. Yang, «Silicon nanotubes», Adv. Mater., т. 14, вып. 17, сс. 1219–1221, 2002.

4.204. E. Tosatti и S. Prestipino, «Weird Gold Nanowires», Science, т. 289, вып. 5479, сс. 561–563, 2000.

4.205. T. Guo, P. Nikolaev, A. Thess, D. T. Colbert, и R. E. Smalley, «Catalytic growth of single-walled manotubes by laser vaporization», Chem. Phys. Lett., т. 243, вып. 1, сс. 49–54, 1995.

4.206. K. S. Kim, G. Cota-Sanchez, C. T. Kingston, M. Imris, B. Simard, и G. Soucy, «Large-scale production of single-walled carbon nanotubes by induction thermal plasma», J. Phys. D. Appl. Phys., т. 40, вып. 8, с. 2375, 2007.

4.207. H. Dai, A. G. Rinzler, P. Nikolaev, A. Thess, D. T. Colbert, и R. E. Smalley, «Single-wall nanotubes produced by metal-catalyzed disproportionation of carbon monoxide», Chem. Phys. Lett., т. 260, вып. 3, сс. 471–475, 1996.

4.208. S. M. Bachilo, L. Balzano, J. E. Herrera, F. Pompeo, D. E. Resasco, и R. B. Weisman, «Narrow (n, m)-distribution of single-walled carbon nanotubes grown using a solid supported catalyst», J. Am. Chem. Soc., т. 125, вып. 37, сс. 11186–11187, 2003.

4.209. Y. Miyauchi, R. Saito, K. Sato, Y. Ohno, S. Iwasaki, T. Mizutani, J. Jiang, и S. Maruyama, «Dependence of exciton transition energy of single-walled carbon nanotubes on surrounding dielectric materials», Chem. Phys. Lett., т. 442, вып. 4, сс. 394–399, 2007.

4.210. Z. Zhou, L. Ci, X. Chen, D. Tang, X. Yan, D. Liu, Y. Liang, H. Yuan, W. Zhou, и G. Wang, «Controllable growth of double wall carbon nanotubes in a floating catalytic system», Carbon N. Y., т. 41, вып. 2, сс. 337–342, 2003.

4.211. K. Bladh, L. K. L. Falk, и F. Rohmund, «On the iron-catalysed growth of single-walled carbon nanotubes and encapsulated metal particles in the gas phase», Appl. Phys. A, т. 70, вып. 3, сс. 317-322, 2000.

4.212. A. Moisala, A. G. Nasibulin, D. P. Brown, H. Jiang, L. Khriachtchev, и E. I. Kauppinen, «Single-walled carbon nanotube synthesis using ferrocene and iron pentacarbonyl in a laminar flow reactor», Chem. Eng. Sci., т. 61, вып. 13, сс. 4393–4402, 2006.

4.213. N. R. Franklin, Y. Li, R. J. Chen, A. Javey, и H. Dai, «Patterned growth of single-walled carbon nanotubes on full 4-inch wafers», Appl. Phys. Lett., т. 79, вып. 27, сс. 4571–4573, 2001.

4.214. K. Ryu, A. Badmaev, C. Wang, A. Lin, N. Patil, L. Gomez, A. Kumar, S. Mitra, H.-S. P. Wong, и C. Zhou, «CMOS-analogous wafer-scale nanotube-on-insulator approach for submicrometer devices and integrated circuits using aligned nanotubes», Nano Lett., т. 9, вып. 1, сс. 189–197, 2008.

4.215. R. T. K. Baker, M. A. Barber, P. S. Harris, F. S. Feates, и R. J. Waite, «Nucleation and growth of carbon deposits from the nickel catalyzed decomposition of acetylene», J. Catal., т. 26, вып. 1, сс. 51–62, 1972.

4.216. D. E. Resasco, W. E. Alvarez, F. Pompeo, L. Balzano, J. E. Herrera, B. Kitiyanan, и A. Borgna, «A scalable process for production of single-walled carbon nanotubes (SWNTs) by catalytic disproportionation of CO on a solid catalyst», J. Nanoparticle Res., т. 4, вып. 1–2, сс. 131–136, 2002.

4.217. Э. Г. Раков, И. В. Аношкин, Ч. Х. Нгуен, А. В. Малых, и М. Т. Нгуен, «Получение, активирование, функциализация, самосборка и перспективы применения углеродных нанотрубок и нановолокон», Нанотехника, т. 4, вып. 12, сс. 8–16, 2007.

4.218. J. Liu и A. T. Harris, «Industrially scalable process to separate catalyst substrate materials from MWNTs synthesised by fluidised-bed CVD on iron/alumina catalysts», Chem. Eng. Sci., т. 64, вып. 7, сс. 1511–1521, 2009.

4.219. C.-T. Hsieh, Y.-T. Lin, J.-Y. Lin, и J.-L. Wei, «Synthesis of carbon nanotubes over Ni-and Co-supported CaCO3 catalysts using catalytic chemical vapor deposition», Mater. Chem. Phys., т. 114, вып. 2, сс. 702–708, 2009.

4.220. I. Willems, Z. Konya, J.-F. Colomer, G. Van Tendeloo, N. Nagaraju, A. Fonseca, и J. B. Nagy, «Control of the outer diameter of thin carbon nanotubes synthesized by catalytic decomposition of hydrocarbons», Chem. Phys. Lett., т. 317, вып. 1, сс. 71–76, 2000.

4.221. S. Hofmann, R. Sharma, C. Ducati, G. Du, C. Mattevi, C. Cepek, M. Cantoro, S. Pisana, A. Parvez, F. Cervantes-Sodi, A. C. Ferrari, R. Dunin-Borkowski, S. Lizzit, L. Petaccia, A. Goldoni, и J. Robertson, «In situ observations of catalyst dynamics during surface-bound carbon nanotube nucleation.», Nano Lett., т. 7, вып. 3, сс. 602-8, 2007.

4.222. D. Takagi, Y. Homma, H. Hibino, S. Suzuki, и Y. Kobayashi, «Single-walled carbon nanotube growth from highly activated metal nanoparticles», Nano Lett., т. 6, вып. 12, сс. 2642–2645, 2006.

4.223. D. Yuan, L. Ding, H. Chu, Y. Feng, T. P. McNicholas, и J. Liu, «Horizontally aligned single-walled carbon nanotube on quartz from a large variety of metal catalysts», Nano Lett., т. 8, вып. 8, сс. 2576–2579, 2008.

4.224. Y. Zhang, W. Zhou, Z. Jin, L. Ding, Z. Zhang, X. Liang, и Y. Li, «Direct growth of single-walled carbon nanotubes without metallic residues by using lead as a catalyst», Chem. Mater., т. 20, вып. 24, сс. 7521-7525, 2008.

4.225. B. Liu, W. Ren, L. Gao, S. Li, Q. Liu, C. Jiang, и H. Cheng, «Manganese-Catalyzed Surface Growth of Single-Walled Carbon Nanotubes with High Efficiency», J. Phys. Chem. C, т. 112, сс. 19231–19235, 2008.

4.226. M. Ritschel, A. Leonhardt, D. Elefant, S. Oswald, и B. Büchner, «Rhenium-catalyzed growth carbon nanotubes», J. Phys. Chem. C, т. 111, вып. 24, сс. 8414–8417, 2007.

4.227. Y. Jia, L. He, L. Kong, J. Liu, Z. Guo, F. Meng, T. Luo, M. Li, и J. Liu, «Synthesis of close-packed multi-walled carbon nanotube bundles using Mo as catalyst», Carbon N. Y., т. 47, вып. 7, сс. 1652-1658, 2009.

4.228. W. Zhou, Z. Han, J. Wang, Y. Zhang, Z. Jin, X. Sun, Y. Zhang, C. Yan, и Y. Li, «Copper catalyzing growth of single-walled carbon nanotubes on substrates», Nano Lett., т. 6, вып. 12, сс. 2987–2990, 2006.

4.229. S. Huang, Q. Cai, J. Chen, Y. Qian, и L. Zhang, «Metal-catalyst-free growth of single-walled carbon nanotubes», J. Am. Chem. Soc., т. 131, вып. 6, сс. 2094–2095, 2009.

4.230. B. Liu, W. Ren, L. Gao, S. Li, S. Pei, C. Liu, C. Jiang, и H.-M. Cheng, «Metal-catalyst-free growth of single-walled carbon nanotubes», J. Am. Chem. Soc., т. 131, вып. 6, сс. 2082-2083, 2009.

4.231. B. Liu, W. Ren, C. Liu, C.-H. Sun, L. Gao, S. Li, C. Jiang, и H.-M. Cheng, «Growth velocity and direct length-sorted growth of short single-walled carbon nanotubes by a metal-catalyst-free chemical vapor deposition process», ACS Nano, т. 3, вып. 11, сс. 3421–3430, 2009.

4.232. D. Takagi, H. Hibino, S. Suzuki, Y. Kobayashi, и Y. Homma, «Carbon nanotube growth from semiconductor nanoparticles», Nano Lett., т. 7, вып. 8, сс. 2272–2275, 2007.

4.233. Y. Homma, H. Liu, D. Takagi, и Y. Kobayashi, «Single-walled carbon nanotube growth with non-iron-group „catalysts“ by chemical vapor deposition», Nano Res., т. 2, вып. 10, сс. 793–799, 2009.

4.234. S. A. Steiner, T. F. Baumann, B. C. Bayer, R. Blume, M. A. Worsley, W. J. MoberlyChan, E. L. Shaw, R. Schloegl, A. J. Hart, S. Hofmann, и B. L. Wardle, «Nanoscale zirconia as a nonmetallic catalyst for graphitization of carbon and growth of single — and multiwall carbon nanotubes», J. Am. Chem. Soc., т. 131, вып. 34, сс. 12144–12154, 2009.

4.235. F. Gao, L. Zhang, и S. Huang, «Zinc oxide catalyzed growth of single-walled carbon nanotubes», Appl. Surf. Sci., т. 256, вып. 8, сс. 2323–2326, 2010.

4.236. X. Yu, J. Zhang, W. Choi, J.-Y. Choi, J. M. Kim, L. Gan, и Z. Liu, «Cap formation engineering: from opened C60 to single-walled carbon nanotubes», Nano Lett., т. 10, вып. 9, сс. 3343–3349, 2010.

4.237. D. Takagi, Y. Kobayashi, и Y. Homma, «Carbon nanotube growth from diamond», J. Am. Chem. Soc., т. 131, вып. 20, сс. 6922–6923, 2009.

4.238. M. Kumar и Y. Ando, «Chemical vapor deposition of carbon nanotubes: a review on growth mechanism and mass production», J. Nanosci. Nanotechnol. т. 10, вып. 6, сс. 3739–3758, 2010.

4.239. H. M. Cheng, F. Li, G. Su, H. Y. Pan, L. L. He, X. Sun, и M. S. Dresselhaus, «Large-scale and low-cost synthesis of single-walled carbon nanotubes by the catalytic pyrolysis of hydrocarbons», Appl. Phys. Lett., т. 72, вып. 25, сс. 3282–3284, 1998.

4.240. L. Ci, H. Zhu, B. Wei, J. Liang, C. Xu, и D. Wu, «Phosphorus — a new element for promoting growth of carbon filaments by the floating catalyst method», Carbon N. Y., т. 37, вып. 10, сс. 1652-1654, 1999.

4.241. A. Moisala, A. G. Nasibulin, и E. I. Kauppinen, «The role of metal nanoparticles in the catalytic production of single-walled carbon nanotubes—a review», J. Phys. Condens. Matter, т. 15, вып. 42, с. S3011, 2003.

4.242. S. Maruyama, R. Kojima, Y. Miyauchi, S. Chiashi, и M. Kohno, «Low-temperature synthesis of high-purity single-walled carbon nanotubes from alcohol», Chem. Phys. Lett., т. 360, вып. 3, сс. 229–234, 2002.

4.243. K. A. Williams, M. Tachibana, J. L. Allen, L. Grigorian, S. C. Cheng, S. L. Fang, G. U. Sumanasekera, A. L. Loper, J. H. Williams, и P. C. Eklund, «Single-wall carbon nanotubes from coal», Chem. Phys. Lett., т. 310, вып. 1, сс. 31-37, 1999.

4.244. T. Tanaka, H. Jin, Y. Miyata, S. Fujii, H. Suga, Y. Naitoh, T. Minari, T. Miyadera, K. Tsukagoshi, и H. Kataura, «Simple and scalable gel-based separation of metallic and semiconducting carbon nanotubes», Nano Lett., т. 9, вып. 4, сс. 1497-1500, 2009.

4.245. M. S. Arnold, A. A. Green, J. F. Hulvat, S. I. Stupp, и M. C. Hersam, «Sorting carbon nanotubes by electronic structure using density differentiation», Nat. Nanotechnol., т. 1, вып. 1, сс. 60–65, 2006.

4.246. M. Zheng и E. D. Semke, «Enrichment of single chirality carbon nanotubes», J. Am. Chem. Soc., т. 129, вып. 19, сс. 6084-6085, 2007.

4.247. X. Tu, S. Manohar, A. Jagota, и M. Zheng, «DNA sequence motifs for structure-specific recognition and separation of carbon nanotubes», Nature, т. 460, вып. 7252, сс. 250–253, 2009.

4.248. I. V. Anoshkin, A. G. Nasibulin, Y. Tian, B. Liu, H. Jiang, и E. I. Kauppinen, «Hybrid carbon source for single-walled carbon nanotube synthesis by aerosol CVD method», Carbon N. Y., т. 78, вып. June 2015, сс. 130–136, 2014.

4.249. A. G. Nasibulin, S. D. Shandakov, M. Y. Timmermans, и E. I. Kauppinen, «Aerosol synthesis and applications of single-walled carbon nanotubes», Russ. Chem. Rev., т. 80, вып. 8, сс. 771–786, 2011.

4.250. A. Kaskela, A. G. Nasibulin, M. Y. Timmermans, B. Aitchison, A. Papadimitratos, Y. Tian, Z. Zhu, H. Jiang, D. P. Brown, A. Zakhidov, и E. I. Kauppinen, «Aerosol-synthesized SWCNT networks with tunable conductivity and transparency by a dry transfer technique», Nano Lett., т. 10, вып. 11, сс. 4349–4355, 2010.

4.251. R. B. Weisman и P. V Subramoney, «Carbon Nanotubes», Electrochem. Soc. Interface, т. 15, вып. 2, сс. 42–46, 2006.

4.252. S. Yamashita, Y. Saito, и J. H. Choi, Carbon nanotubes and graphene for photonic applications. Cambridge: Woodhead Publishing, 2013.

4.253. H. Kataura, «Optical Properties of Single-Wall Carbon Nanotubes», Synth. Met., т. 103, сс. 1-4, 1999.

4.254. S. M. Tabakman, K. Welsher, G. Hong, и H. Dai, «Optical properties of single-walled carbon nanotubes separated in a density gradient: Length, bundling, and aromatic stacking effects», J. Phys. Chem. C, т. 114, вып. 46, сс. 19569–19575, 2010.

4.255. M. J. O. Connell, «Band Gap Fluorescence from Individual Single-Walled Carbon Nanotubes», т. 593, вып. 2002, сс. 593–596, 2010.

4.256. P. Cherukuri, S. M. Bachilo, S. H. Litovsky, и R. B. Weisman, «Near-infrared fluorescence microscopy of single-walled carbon nanotubes in phagocytic cells», J. Am. Chem. Soc., т. 126, вып. 48, сс. 15638–15639, 2004.

4.257. P. Cherukuri, C. J. Gannon, T. K. Leeuw, H. K. Schmidt, R. E. Smalley, S. A. Curley, и R. B. Weisman, «Mammalian pharmacokinetics of carbon nanotubes using intrinsic near-infrared fluorescence», Proc. Natl. Acad. Sci., т. 103, вып. 50, сс. 18882–18886, 2006.

4.258. K. Welsher, Z. Liu, D. Daranciang, и H. Dai, «Selective probing and imaging of cells with single walled carbon nanotubes as near-infrared fluorescent molecules», Nano Lett., т. 8, вып. 2, сс. 586–590, 2008.

4.259. T. K. Leeuw, R. M. Reith, R. A. Simonette, M. E. Harden, P. Cherukuri, D. A. Tsyboulski, K. M. Beckingham, и R. B. Weisman, «Single-walled carbon nanotubes in the intact organism: near-IR imaging and biocompatibility studies in Drosophila», Nano Lett., т. 7, вып. 9, сс. 2650–2654, 2007.

4.260. K. Welsher, Z. Liu, S. P. Sherlock, J. T. Robinson, Z. Chen, D. Daranciang, и H. Dai, «A route to brightly fluorescent carbon nanotubes for near-infrared imaging in mice», Nat. Nanotechnol., т. 4, вып. 11, сс. 773–780, 2009.

4.261. P. Nikolaev, M. J. Bronikowski, R. K. Bradley, F. Rohmund, D. T. Colbert, K. A. Smith, и R. E. Smalley, «Gas-phase catalytic growth of single-walled carbon nanotubes from carbon monoxide», Chem. Phys. Lett., т. 313, вып. 1, сс. 91–97, 1999.

4.262. Jack Deslippe, §. Catalin D. Spataru, David Prendergast, and Steven G. Louie, «Bound Excitons in Metallic Single-Walled Carbon Nanotubes», Nano Lett., т. 7, вып. 6, сс. 1626–1630, 2007.

4.263. C. D. Spataru, S. Ismail-Beigi, L. X. Benedict, и S. G. Louie, «Excitonic Effects and Optical Spectra of Single-Walled Carbon Nanotubes», Phys. Rev. Lett., т. 92, вып. 7, с. 77402, фев. 2004.

4.264. T. Koyama, S. Shimizu, T. Saito, Y. Miyata, H. Shinohara, и A. Nakamura, «Ultrafast luminescence kinetics of metallic single-walled carbon nanotubes: Possible evidence for excitonic luminescence», Phys. Rev. B — Condens. Matter Mater. Phys., т. 85, вып. 4, сс. 1–7, 2012.

4.265. J. A. Misewich, R. Martel, P. Avouris, J. C. Tsang, S. Heinze, и J. Tersoff, «Electrically Induced Optical Emission from a Carbon Nanotube FET», Science, т. 300, вып. 5620, сс. 783-786, май 2003.

4.266. M. Freitag, J. Chen, J. Tersoff, J. C. Tsang, Q. Fu, J. Liu, и P. Avouris, «Mobile ambipolar domain in carbon-nanotube infrared emitters», Phys. Rev. Lett., т. 93, вып. 7, с. 76803, 2004.

4.267. J. Chen, V. Perebeinos, M. Freitag, J. Tsang, Q. Fu, J. Liu, и P. Avouris, «Bright Infrared Emission from Electrically Induced Excitons in Carbon Nanotubes», Science, т. 310, вып. 5751, сс. 1171–1174, ноя. 2005.

4.268. M. Freitag, V. Perebeinos, J. Chen, A. Stein, J. C. Tsang, J. A. Misewich, R. Martel, и P. Avouris, «Hot Carrier Electroluminescence from a Single Carbon Nanotube», Nano Lett., т. 4, вып. 6, сс. 1063–1066, 2004.

4.269. D. Janas, N. Czechowski, B. Krajnik, S. Mackowski, и K. K. Koziol, «Electroluminescence from carbon nanotube films resistively heated in air», Appl. Phys. Lett., т. 102, вып. 18, 2013.

4.270. X. He, F. Léonard, и J. Kono, «Uncooled Carbon Nanotube Photodetectors», Adv. Opt. Mater., т. 3, вып. 8, сс. 989–1011, авг. 2015.

4.271. M. E. Itkis, F. Borondics, A. Yu, и R. C. Haddon, «Bolometric Infrared Photoresponse of Suspended Single-Walled Carbon Nanotube Films», Science, т. 312, вып. 5772, сс. 413–416, апр. 2006.

4.272. M. Henini и M. Razeghi, Handbook of infrared detection technologies. Elsevier, 2002.

4.273. G. Vera-Reveles, T. J. Simmons, M. Bravo-Sánchez, M. a Vidal, H. Navarro-Contreras, и F. J. González, «High-sensitivity bolometers from self-oriented single-walled carbon nanotube composites», ACS Appl. Mater. Interfaces, т. 3, вып. 8, сс. 3200-4, 2011.

4.274. A. Fujiwara, Y. Matsuoka, H. Suematsu, N. Ogawa, K. Miyano, H. Kataura, Y. Maniwa, S. Suzuki, и Y. Achiba, «Photoconductivity in semiconducting single-walled carbon nanotubes», Jpn. J. Appl. Phys., т. 40, вып. 11B, с. L1229, 2001.

4.275. S. Lu и B. Panchapakesan, «Photoconductivity in single wall carbon nanotube sheets», Nanotechnology, т. 17, вып. 8, с. 1843, 2006.

4.276. K. G. Mikheev, A. S. Saushin, R. G. Zonov, A. G. Nasibulin, и G. M. Mikheev, «Photon-drag in single-walled carbon nanotube and silver-palladium films: the effect of polarization», J. Nanophotonics, т. 10, вып. 1, с. 012505, 2015.

4.277. G. M. Mikheev, A. G. Nasibulin, R. G. Zonov, A. Kaskela, и E. I. Kauppinen, «Photon-Drag Effect in Single-Walled Carbon Nanotube Films», Nano Lett., т. 12, вып. 1, сс. 77-83, янв. 2012.

4.278. G. S. Tulevski, A. D. Franklin, и A. Afzali, «High purity isolation and quantification of semiconducting carbon nanotubes via column chromatography», ACS Nano, т. 7, вып. 4, сс. 2971–2976, 2013.

4.279. G. Zhang, P. Qi, X. Wang, Y. Lu, X. Li, R. Tu, S. Bangsaruntip, D. Mann, L. Zhang, и H. Dai, «Selective etching of metallic carbon nanotubes by gas-phase reaction», Science, т. 314, вып. 5801, сс. 974–977, 2006.

4.280. D. Sun, M. Y. Timmermans, Y. Tian, A. G. Nasibulin, E. I. Kauppinen, S. Kishimoto, T. Mizutani, и Y. Ohno, «Flexible high-performance carbon nanotube integrated circuits», Nat. Nanotechnol., т. 6, вып. 3, сс. 156–161, 2011.

4.281. A. V. Naumov, O. A. Kuznetsov, A. R. Harutyunyan, A. A. Green, M. C. Hersam, D. E. Resasco, P. N. Nikolaev, и R. B. Weisman, «Quantifying the semiconducting fraction in single-walled carbon nanotube samples through comparative atomic force and photoluminescence microscopies», Nano Lett., т. 9, вып. 9, сс. 3203–3208, 2009.

4.282. M. Y. Timmermans, D. Estrada, A. G. Nasibulin, J. D. Wood, A. Behnam, D. M. Sun, Y. Ohno, J. W. Lyding, A. Hassanien, E. Pop, и E. I. Kauppinen, «Effect of carbon nanotube network morphology on thin film transistor performance», Nano Res., т. 5, вып. 5, сс. 307–319, 2012.

4.283. D.-M. Sun, M. Y. Timmermans, A. Kaskela, A. G. Nasibulin, S. Kishimoto, T. Mizutani, E. I. Kauppinen, и Y. Ohno, «Mouldable all-carbon integrated circuits», Nat. Commun., т. 4, сс. 1–8, 2013.

4.284. A. E. Islam, J. A. Rogers, и M. A. Alam, «Recent Progress in Obtaining Semiconducting Single-Walled Carbon Nanotubes for Transistor Applications», Adv. Mater., т. 27, вып. 48, сс. 7908–7937, дек. 2015.

4.285. F. Kreupl, «Electronics: Carbon nanotubes finally deliver», Nature, т. 484, вып. 7394, сс. 321–322, 2012.

4.286. Q. Cao, S.-H. Hur, Z.-T. Zhu, Y. G. Sun, C.-J. Wang, M. A. Meitl, M. Shim, и J. A. Rogers, «Highly Bendable, Transparent Thin-Film Transistors That Use Carbon-Nanotube-Based Conductors and Semiconductors with Elastomeric Dielectrics», Adv. Mater., т. 18, вып. 3, сс. 304–309, 2006.

4.287. E. Artukovic, M. Kaempgen, D. Hecht, S. Roth, и G. Gruener, «Transparent and flexible carbon nanotube transistors», Nano Lett., т. 5, вып. 4, сс. 757–760, 2005.

4.288. E. Kymakis и G. A. J. Amaratunga, «Single-wall carbon nanotube/conjugated polymer photovoltaic devices», Appl. Phys. Lett., т. 80, вып. 1, с. 112, 2002.

4.289. E. Kymakis, I. Alexandrou, и G. A. J. Amaratunga, «High open-circuit voltage photovoltaic devices from carbon-nanotube-polymer composites», J. Appl. Phys., т. 93, вып. 3, с. 1764, 2003.

4.290. S. Berson, R. de Bettignies, S. Bailly, S. Guillerez, и B. Jousselme, «Elaboration of P3HT/CNT/PCBM Composites for Organic Photovoltaic Cells», Adv. Funct. Mater. т. 17, вып. 16, сс. 3363-3370, 2007.

4.291. X. Li, Z. Lv, и H. Zhu, «Carbon/Silicon Heterojunction Solar Cells: State of the Art and Prospects», Adv. Mater., вып. 27, сс. 6549–6574, 2015.

4.292. J. Wei, Y. Jia, Q. Shu, Z. Gu, K. Wang, D. Zhuang, G. Zhang, Z. Wang, J. Luo, и A. Cao, «Double-walled carbon nanotube solar cells», Nano Lett., т. 7, вып. 8, сс. 2317–2321, 2007.

4.293. Y. Jia, A. Cao, X. Bai, Z. Li, L. Zhang, N. Guo, J. Wei, K. Wang, H. Zhu, и D. Wu, «Achieving high efficiency silicon-carbon nanotube heterojunction solar cells by acid doping», Nano Lett., т. 11, вып. 5, сс. 1901–1905, 2011.

4.294. F. Wang, D. Kozawa, Y. Miyauchi, K. Hiraoka, S. Mouri, Y. Ohno, и K. Matsuda, «Considerably improved photovoltaic performance of carbon nanotube-based solar cells using metal oxide layers», Nat. Commun., т. 6, 2015.

4.295. X. Yang, Z. Li, F. He, M. Liu, B. Bai, W. Liu, X. Qiu, H. Zhou, C. Li, и Q. Dai, «Enhanced field emission from a carbon nanotube array coated with a hexagonal boron nitride thin film», Small, сс. 1–7, 2015.

4.296. S. Sridhar, C. Tiwary, S. Vinod, J. J. Taha-tijerina, K. Kalaga, B. Sirota, A. H. C. Hart, S. Ozden, K. Sinha, R. Vajtai, W. Choi, K. Kordás, и P. M. Ajayan, «Field Emission with Ultra-Low Turn-On Voltage from Metal Decorated Carbon Nanotubes Field Emission with Ultra-Low Turn-On Voltage from Metal Decorated Carbon Nanotubes», вып. 8, сс. 7763–7770, 2014.

4.297. D. D. Nguyen, Y. T. Lai, и N. H. Tai, «Enhanced field emission properties of a reduced graphene oxide/carbon nanotube hybrid film», Diam. Relat. Mater. т. 47, сс. 1–6, 2014.

4.298. H. Zanin, P. W. May, M. H. M. O. Hamanaka, и E. J. Corat, «Field emission from hybrid diamond-like carbon and carbon nanotube composite structures», ACS Appl. Mater. Interfaces, т. 5, вып. 23, сс. 12238–43, 2013.

4.299. P. Liu, Y. Wei, K. Liu, L. Liu, K. Jiang, и S. Fan, «New-type planar field emission display with superaligned carbon nanotube yarn emitter», Nano Lett., т. 12, вып. 5, сс. 2391-2396, 2012.

4.300. W. B. Choi, D. S. Chung, J. H. Kang, H. Y. Kim, Y. W. Jin, I. T. Han, Y. H. Lee, J. E. Jung, N. S. Lee, G. S. Park, и J. M. Kim, «Fully sealed, high-brightness carbon-nanotube field-emission display», Appl. Phys. Lett., т. 75, вып. 20, с. 3129, 1999.

4.301. M. Bansal, R. Srivastava, C. Lal, M. N. Kamalasanan, и L. S. Tanwar, «Carbon nanotube-based organic light emitting diodes», Nanoscale, т. 1, вып. 3, с. 317, 2009.

4.302. S. Curran, A. P. Davey, J. Coleman, A. Dalton, B. McCarthy, S. Maier, A. Drury, D. Gray, M. Brennan, и K. Ryder, «Evolution and evaluation of the polymer/nanotube composite», Synth. Met., т. 103, вып. 1, сс. 2559–2562, 1999.

4.303. D. S. Ginley, H. Hosono, и D. C. Paine, Handbook of transparent conductors. Springer US, 2011.

4.304. Z. Chen, «A mechanical assessment of flexible optoelectronic devices», Thin Solid Films, т. 394, вып. 1-2, сс. 201–205, 2001.

4.305. J. K. Wassei и R. B. Kaner, «Graphene, a promising transparent conductor», Mater. Today, т. 13, вып. 3, сс. 52–59, 2010.

4.306. D. S. Hecht, L. Hu, и G. Irvin, «Emerging transparent electrodes based on thin films of carbon nanotubes, graphene, and metallic nanostructures», Adv. Mater., т. 23, вып. 13, сс. 1482–1513, 2011.

4.307. G. Eda, G. Fanchini, и M. Chhowalla, «Large-area ultrathin films of reduced graphene oxide as a transparent and flexible electronic material», Nat. Nanotechnol., т. 3, вып. 5, сс. 270–274, 2008.

4.308. S. Bae, H. Kim, Y. Lee, X. Xu, J.-S. Park, Y. Zheng, J. Balakrishnan, T. Lei, H. R. Kim, Y. Il Song, Y.-J. Kim, K. S. Kim, B. Ozyilmaz, J.-H. Ahn, B. H. Hong, и S. Iijima, «Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes», Nat. Nanotechnol., т. 5, вып. 8, сс. 574–578, 2010.

4.309. Y. Tian, M. Y. Timmermans, M. Partanen, A. G. Nasibulin, H. Jiang, Z. Zhu, и E. I. Kauppinen, «Growth of single-walled carbon nanotubes with controlled diameters and lengths by an aerosol method», Carbon N. Y., т. 49, вып. 14, сс. 4636–4643, 2011.

4.310. S. De, T. M. Higgins, P. E. Lyons, E. M. Doherty, P. N. Nirmalraj, W. J. Blau, J. J. Boland, и J. N. Coleman, «Silver Nanowire Networks as Flexible, Transparent, Conducting Films: Extremely High DC to Optical Conductivity Ratios», ACS Nano, т. 3, вып. 7, сс. 1767–1774, июл. 2009.

4.311. L. Hu, H. Wu, и Y. Cui, «Metal nanogrids, nanowires, and nanofibers for transparent electrodes», MRS Bull., т. 36, сс. 760–765, 2011.

4.312. K. Mustonen, P. Laiho, A. Kaskela, Z. Zhu, O. Reynaud, N. Houbenov, Y. Tian, T. Susi, H. Jiang, A. G. Nasibulin, и E. I. Kauppinen, «Gas phase synthesis of non-bundled, small diameter single-walled carbon nanotubes with near-armchair chiralities», Appl. Phys. Lett., т. 107, вып. 013106, сс. 1–5, июл. 2015.

4.313. A. G. Nasibulin, A. Kaskela, K. Mustonen, A. S. Anisimov, V. Ruiz, S. Rackauskas, M. Y. Timmermans, M. Pudas, и B. Aitchison, «Multifunctional Free-Standing Single-Walled Carbon Nanotube Films», ACS Nano, т. 5, вып. 4, сс. 3214–3221, 2011.

4.314. A. A. Green и M. C. Hersam, «Processing and properties of highly enriched double-wall carbon nanotubes», Nat Nano, т. 4, вып. 1, сс. 64–70, янв. 2009.

4.315. Y. H. Lee и H. Geng, «Transparent Conducting Films by Using Carbon Nanotubes», в Nanoscale Phenomena Basic Science to Device Applications, Z. Tang и P. Sheng, Ред. Springer, 2008, сс. 1–14.

4.316. D. S. Hecht, A. M. Heintz, R. Lee, L. Hu, B. Moore, C. Cucksey, и S. Risser, «High conductivity transparent carbon nanotube films deposited from superacid», Nanotechnology, т. 22, вып. 7, с. 75201, 2011.

4.317. C. Biswas и Y. H. Lee, «Graphene versus carbon nanotubes in electronic devices», Adv. Funct. Mater. т. 21, вып. 20, сс. 3806–3826, 2011.

4.318. M. Batmunkh, M. J. Biggs, и J. G. Shapter, «Carbon Nanotubes for Dye-Sensitized Solar Cells», Small, т. 11, вып. 25, сс. 2963–2989, 2015.

4.319. M. W. Rowell, M. A. Topinka, M. D. McGehee, H.-J. Prall, G. Dennler, N. S. Sariciftci, L. Hu, и G. Gruner, «Organic solar cells with carbon nanotube network electrodes», Appl. Phys. Lett., т. 88, вып. 23, с. 233506, 2006.

4.320. J. Van De Lagemaat, T. M. Barnes, G. Rumbles, S. E. Shaheen, T. J. Coutts, C. Weeks, I. Levitsky, J. Peltola, и P. Glatkowski, «Organic solar cells with carbon nanotubes replacing In2 O3: Sn as the transparent electrode», Appl. Phys. Lett., т. 88, вып. 23, сс. 3–6, 2006.

4.321. А. В. Крестинин, Н. Н. Дремова, Е. И. Кнерельман, Л. Н. Блинова, В. Г. Жигалина, и Н. А. Киселев, «Характеризация ОСУНТ-продуктов российского производства и перспективы их промышленного применения», Российские Нанотехнологии, т. 10, вып. 7-8, сс. 30–38, 2015.

4.322. S. K. Samanta, M. Fritsch, U. Scherf, W. Gomulya, S. Z. Bisri, и M. A. Loi, «Conjugated polymer-assisted dispersion of single-wall carbon nanotubes: the power of polymer wrapping», Acc. Chem. Res., т. 47, вып. 8, сс. 2446–2456, 2014.

4.323. H. Wang, J. Mei, P. Liu, K. Schmidt, G. Jiмйnez-Osйs, S. Osuna, L. Fang, C. J. Tassone, A. P. Zoombelt, и A. N. Sokolov, «Scalable and selective dispersion of semiconducting arc-discharged carbon nanotubes by dithiafulvalene/thiophene copolymers for thin film transistors», ACS Nano, т. 7, вып. 3, сс. 2659–2668, 2013.

4.324. H. Liu, D. Nishide, T. Tanaka, и H. Kataura, «Large-scale single-chirality separation of single-wall carbon nanotubes by simple gel chromatography», Nat Commun, т. 2, с. 309, май 2011.

4.325. S. Fujii, T. Tanaka, Y. Miyata, H. Suga, Y. Naitoh, T. Minari, T. Miyadera, K. Tsukagoshi, и H. Kataura, «Performance enhancement of thin-film transistors by using high-purity semiconducting single-wall carbon nanotubes», Appl. Phys. express, т. 2, вып. 7, с. 71601, 2009.

4.326. Kimmo Mustonen, «On the limit of single-walled carbon nanotube random network conductivity», PhD Dissertation, Aalto University, 2015.

4.327. Летохов, В. С. Селективное действие лазерного излучения на вещество / В. С. Летохов // УФН.— 1978.— Т. 125.— С. 57–96.

4.328. Letokhov, V. Laser Control of Atoms and Molecules / V. Letokhov // Oxford University Press.— 2007.— 310 p.— ISBN: 0198528167.

4.329. Duarte, F. J. Tunable laser optics: Applications to optics and quantum optics / F. J. Duarte // Progress in Quantum Electronics.— 2013.— v. 37.— No. 6.— P. 326–347.

4.330. Letokhov, V. S. Cooling and trapping of atoms and molecules by resonant laser field / V. S. Letokhov, V. G. Minogin, B. D. Pavlik // Optics Comm.— 1976.— v. 19.— No. 1.— P. 72–75.

4.331. Metcalf, H. J. Laser Cooling and Trapping / H. J. Metcalf, P. Straten // Springer Science & Business Media.— 2001.— 324 p.— ISBN: 0387987282.

4.332. Балыкин, В. И. Ультрахолодные атомы и атомная оптика / В. И. Балыкин // УФН.— 2011.— Т. 181 — С. 875–884.

4.333. Карлов, Н. В. Лазерное разделение изотопов / Н. В. Карлов, А. М. Прохоров // УФН.— 1976.— Т. 118.— С. 583–609.

4.334. Letokhov, V. S. Laser isotope separation / V. S. Letokhov // Nature.— 1979.— v. 277.— No. 5698.— P. 605–610.

4.335. Bokhan, P. A. Laser Isotope Separation in Atomic Vapor / P. A. Bokhan, V. V. Buchanov, N. V. Fateev, M. M. Kalugin, M. A. Kazaryan, A. M. Prokhorov, D. E. Zakrevskii // Wiley-VCH.— 2006.— 198 p.— ISBN: 3527406212.

4.336. Скворцов, Л. А. Лазерные методы дистанционного обнаружения химических соединений на поверхности тел / Л. А. Скворцов // Техносфера.— 2014.— 208 с.— ISBN: 978-5-94836-387-5.

4.337. Изосимов, И. Н. Лазерный ультрачувствительный анализ малых концентраций элементов / И. Н. Изосимов // Физика элементарных частиц и атомного ядра.— 2007.— Т. 38.— No. 2.— С. 360–408.

4.338. Liao, Z. Coherent atom lithography with nanometer resolution / Z. Liao, M. Al-Amri, M. S. Zubairy // Phys. Rev. A.— 2013.— 053809.

4.339. Riehle, F. Frequency Standards: Basics and Applications / F. Riehle // Wiley-VCH.— 2006.— 540 p.— ISBN: 978-3-527-60595-8.

4.340. Pfau, T. Coherent optical communication: Towards realtime systems at 40 Gbit/s and beyond / T. Pfau, S. Hoffmann, O. Adamczyk, R. Peveling, V. Herath, M. Porrmann, R. Noй // Opt. Express.— 2008.— v. 16.— No. 2.— P. 866–872.

4.341. Kikuchi, K. Fundamentals of Coherent Optical Fiber Communications / K. Kikuchi // J. Lightwave Technol.— 2016.— v. 34.— No. 1.

4.342. Saxby, G. Practical Holography, Fourth Edition / G. Saxby, S. Zacharovas // CRC Press.— 2015.— 642 p.— ISBN: 9781482251579.

4.343. Hariharan, P. Basics of Interferometry, Second Edition / P. Hariharan // Elsevier Inc.— 2007.— 248 p.— ISBN: 0123735890.

4.344. Webb, C. E. Handbook of Laser Technology and Applications / C. E. Webb, J. D. Jones // CRC Press.— 2003.— 2752 p.— ISBN: 9780750306072.

4.345. Arun, R. Atom nanolithography with multilayer light masks: Particle optics analysis /R. Arun, I. S. Averbukh, T. Pfau // Phys. Rev. A.— 2005.— v. 72.— 023417.

4.346. Gibney, E. Hyper-precise atomic clocks face off to redefine time / E. Gibney // Nature.— 2015.— v. 522.— P. 16–17.

4.347. Groth, S. Atom Chips: Fabrication and Thermal Properties / S. Groth, P. Krьger, S. Wildermuth, R. Folman, T. Fernholz, J. Schmiedmayer, D. Mahalu, I. Bar-Jospeh // Appl. Phys. Lett.— 2004.— v. 85.— 2980.

4.348. Nicholson, T. L. Systematic evaluation of an atomic clock at $2x10^{-18}$ total uncertainty / T. L. Nicholson, S. L. Campbell, R. B. Hutson, G. E. Marti, B. J. Bloom, R. L. McNally, W. Zhang, M. D. Barrett, M. S. Safronova, G. F. Strouse, W. L. Tew, J. Ye / Nature Communications.— 2015.— V. 6— 6896.

4.349. Poli, N. A transportable strontium optical lattice clock / N. Poli, M. Schioppo, S. Vogt, St. Falke, U. Sterr, Ch. Lisdat, G. M. Tino // Appl. Phys. B.— 2014.— v. 117.— P. 1107–1116.

4.350. Слюсарев, С. Н. Высокостабильный оптический стандарт частоты на холодных атомах стронция-87 / С. Н. Слюсарев, А. С. Костин, В. Н. Барышев, К. Л. Хабарова, В. Г. Пальчиков, С. Н. Стрелкин // Мир измерений.— 2012.— №4. — С. 26–29.

4.351. Чеберко, И. Точность ГЛОНАСС повысят в два раза до конца текущего года / И. Чеберко // Известия.— 5 ноября 2015.— [Электронный ресурс] // URL: http: // izvestia.ru/news/585537

4.352. Наний, О. Е. Когерентные системы связи / О. Е. Наний // LIGHTWAVE Russian Edition.— 2008.— No. 4.— С. 23–27.

4.353. Ткачев, А. Н. О лазерном разделении редких изотопов / А. Н. Ткачев, С. И. Яковленко // Квантовая электроника.— 2003.— Т. 33.— No. 7.— С. 581–592.

4.354. Taylor, L. High power narrowband 589nm frequency doubled fibre laser source / L. Taylor, Y. Feng, D. B. Calia // Opt. Express.— 2009.— v. 17.— No. 17.— P. 14687–14693.

4.355. Strößner, U. Single-frequency continuous-wave optical parametric oscillator system with an ultrawide tuning range of 550 to 2830 nm / U. Strößner, J. Meyn, R. Wallenstein, P. Urenski, A. Arie, G. Rosenman, J. Mlynek, S. Schiller, A. Peters // J. Opt. Soc. Am. B.— 2002.— v. 19.— P. 1419–1424.

4.356. Loas, G. Dual-Frequency 780-nm Ti: Sa Laser for High Spectral Purity Tunable CW THz Generation / G. Loas, M. Romanelli, M. Alouini // Photon. Technol. Lett.— 2014.— v. 26.— No. 15.— P. 1518–1521.

4.357. Sparkes, B. M. Precision spectral manipulation: a demonstration using a coherent optical memory / B. M. Sparkes, M. Hosseini, C. Cairns, D. Higginbottom, G. T. Campbell, P. K. Lam, B. C. Buchler // Phys. Rev. X.— 2012. — V. 2.— 021011.

4.358. Liu, Z. Coherent beam combining of high power fiber lasers: Progress and prospect / Z. Liu, P. Zhou, X. Xu, X. Wang, Y. Ma // Science China Technological Sciences.— 2013.— v. 56.— No. 7.— P. 1597–1606.

4.359. Hemmati, H. Generation of continuous-wave 194-nm radiation by sum-frequency mixing in an external ring cavity / H. Hemmati, J. C. Bergquist, W. M. Itano // Opt. Commun.— 1983.— v. 8.— P. 73-75.

4.360. Bourzeix, S. Efficient frequency doubling of a continuous wave titanium: sapphire laser in an external enhancement cavity / S. Bourzeix, M. D. Plimmer, F. Nez, L. Julien, F. Biraben // Opt. Commun.— 1993.— v. 99.— No. 1–2.— P. 89–94.

4.361. Kumagai, H. Efficient frequency doubling of 1-W continuous-wave Ti:sapphire laser with a robust high-finesse external cavity / H. Kumagai, Y. Asakawa, T. Iwane, K. Midorikawa, M. Obara // Appl. Opt.— 2003.— v. 42.— No. 6.— P. 1036–1039.

4.362. Hovis F. Single frequency lasers for remote sensing / F. Hovis, M. Rhoades, R. Burnham, J. Force, T. Schum, B. Gentry, H. Chen, S. Li, J. Hair, A. Cook, C. Hostetler // Proc. SPIE.— 2004.— v. 5332.— P. 263–270.

4.363. Зимняков, Д. А. Оптическая томография тканей / Д. А. Зимняков, В. В. Тучин // Квантовая Электроника.— 2002.— Т. 32. — №10.— С. 849–867.

4.364. Акчурин, Г. Г. Способ оптической когерентной томографии / Г. Г. Акчурин, А. Г. Акчурин // Патент РФ №2303393.— Приоритет 23.12.2005.— Опубликовано 27.07.2007.

4.365. Dai, D. P. A linewidth-narrowed and frequency-stabilized dye laser for application in laser cooling of molecules / D. P. Dai, Y. Xia, Y. N. Yin, X. X. Yang, Y. F. Fang, X. J. Li, J. P. Yin // Opt. Express.— 2014.— V.22.— No. 23.— P. 28646–28652.

4.366. Beterov, I. I. Simple digital system for tuning and long-term frequency stabilization of a CW Ti:Sapphire laser / I. I. Beterov, A. G. Markovski, S. M. Kobtsev, E. A.Yakshina, V. M. Entin, D. B. Tretyakov, V. I. Baraulya, I. I. Ryabtsev // Optical Engineering.— 2015.— v. 54. No. 3.— 034111.

4.367. Lu, H. Single frequency Ti:sapphire laser with continuous frequency-tuning and low intensity noise by means of the additional intracavity nonlinear loss / H. Lu, X. Sun, M. Wang, J. Su, K. Peng // Opt. Express.— 2014.— v. 22.— No. 20.— P. 24551–24558.

4.368. Kobtsev, S. Resonant doubler with a 2-THz automatic quasi-smooth scan range for widely tunable CW single-frequency lasers / S. Kobtsev, V. Lunin // Proc. SPIE.— 2007.— v. 6455.— 645517.

4.369. Moloney, J. V. Quantum design of semiconductor active materials: laser and amplifier applications / J. V. Moloney, J. Hader, S. W. Koch // Laser & Photonics Reviews.— 2007.— v. 1.— No. 1.— P. 24–43.

4.370. Hecht, J. Fiber lasers: The state of the art / J. Hecht // Laser Focus World.— 2012.— v. 48.— No. 4.— P. 57.

4.371. Перечень критических технологий Российской Федерации, Электрон. дан.— Россия, 2011.— [Электронный ресурс] // URL: http://kremlin.ru/supplement/988

4.372. В.Л. Величанский, В. Л. Лазерные стандарты частоты в ФИАН / В. Л. Величанский, М. А. Губин // УФН. 2009.— Т. 179.— №11ю — С. 1219–1224.

4.373. Khripunov S. Atomic clock based on a coherent population trapping resonance in 87Rb with improved high-frequency modulation parameters / S. Khripunov, D. Radnatarov, S. Kobtsev // Proc. SPIE.— 2015.— v. 9378.— 93780A.

4.374. Kobtsev, S. Wide-autoscanned narrow-line tunable system based on CW Ti: Sapphire/Dye laser for high precision experiments in nanophysics // S. Kobtsev, V. Baraulya, V. Lunin // Proc. SPIE.— 2009.— v. 7193.— 71932S.

4.375. Radnatarov, D. 240-GHz continuously frequency-tuneable Nd: YVO4/LBO laser with two intra-cavity locked etalons // D. Radnatarov, S. Kobtsev, S. Khripunov, V. Lunin // Opt. Express.— 2015.— v. 23.— No. 21.— P. 27322–27327.

4.376. SolsTiS: automated, widely tunable, CW narrow linewidth Ti Sapphire laser system.— [Электронный ресурс] // URL: http://www.m2lasers.com/products/laser-systems/ti-sapphire-laser.aspx

4.377. Henderson, A. Advances in Light Sources: Fiber lasers tune to the visible / A. Henderson // Laser Focus World.— 2014.— v. 50.— No. 6.

4.378. Chena, W. Continuous-wave mid-infrared laser sources based on difference frequency generation / W. Chena, J. Cousina, E. Poulleta, J. Buriea, D. Bouchera, X. Gaob, M. W. Sigristc, F. K. Titteld // Comptes Rendus Physique.— 2007.— v. 8.— No. 10.— P. 1129–1150.

4.379. Coldren, L. A. Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits / L. A. Coldren, S. W. Corzine, M. L. Mashanovitch // John Wiley & Sons.— 2012.— 744 p.— ISBN: 1118148177.

4.380. Overton, G. Laser Marketplace 2014: Lasers forge 21st century innovations / G. Overton, A. Nogee, C. Holton // Laser Focus World.— 2014.— No. 1.

4.381. Overton, G. Laser Marketplace 2015: Lasers surround us in the Year of Light / G. Overton, D. A. Belforte, A. Nogee, C. Holton // Laser Focus World.— 2015.— No. 1.

4.382. Overton, G. Annual Laser Market Review & Forecast: Can laser markets trump a global slowdown? / G. Overton, A. Nogee, D. A. Belforte, C. Holton // Laser Focus World.— 2016.— No. 1.

Глава 5

5.1. O'Mahony, M. Future optical networks / M. O'Mahony // in Optical Fiber Telecommunications V B: Systems and Networks. Elsevier Inc. 611 — 640, 2008.

5.2. D. Richardson, "Filling the Light Pipe", SCIENCE, 330, 327, 2010.

5.3. G. P. Agrawal, N. K. Dutta, "Semiconductor Lasers", Second Edition, Van Nostrand Reinhold, New York, ISBN: 0-442-01102-4.

5.4. P. Poggiolini, «The GN Model of Non-Linear Propagation in Uncompensated Coherent Optical Systems", J. Lightw. Technol, 30, 24, 3857 — 3879, 2012.

5.5. В. Трещиков, О. Наний «Новое поколение систем связи», Фотон-экспресс, 4 (116), 18–20, 2014.

5.6. С. Маковей, Н. Коротков, «Тенденции развития оптических систем связи, работающих со скоростью более 100 Гбит/с», Фотон-экспресс, 1 (113), 17–19, 2014.

5.7. Н. Гуркин, О. Наний, В. Трещиков, Р. Убайдуллаев «Производительность когерентных DWDM-систем с канальной скоростью 100 Гбит/с», Вестник связи, 2, 39–40, 2013.

5.8. В. Конышев, А. Леонов, О. Наний, В. Трещиков, Р. Убайдуллаев, «Рекордная производительность систем 100G как маркер перехода к эволюционному развитию ВОСП», Первая миля, 6, 40-43, 2015.

5.9. M. Nakazawa, T. Hirooka, M. Yoshida, K. Kasai, «Extremely Higher-Order Modulation Formats», Optical Fiber Telecommunications VI B: Systems and Networks. Elsevier Inc., 297 — 336, 2013.

5.10. G. Raibon et al., «High Symbol Rate Coherent Optical Transmission Systems: 80 and 107 Gbaud», J. Lightwave Technol. 32, 4, 824–826, 2014.

5.11. B. Guan et al., «Bandwidth scalable and high fidelity spectrally-sliced transmitter», OFC, paper M2G.2, 2015.

5.12. H.-G. Weber, R. Ludwig, «Ultra-high-speed OTDM transmission technology», in Optical Fiber Telecommunications V, B: Systems and Networks. Elsevier Inc., 201 — 232, 2008.

5.13. M. Saruwatari, «All-optical time-division multiplexing technology», in Fiber Optic Communication Devices (N. Grote and H. Venghaus, Eds), Berlin: Springer-Verlag, 2001.

5.14. А. Леонов, О. Наний, В. Трещиков, «Усилители на основе вынужденного комбинационного рассеяния в оптических системах связи», Прикладная фотоника, 1, 26-49, 2014.

5.15. Е. Дианов, С. Фирстов, В. Хопин, А. Гурьянов, И. Буфетов, «Висмутовые волоконные лазеры и усилители, работающие в области 1.3 мкм», Квантовая электроника, 38:7, 615–617, 2008.

5.16. V. Dvoyrin, O. Medvedkov, V. Mashinsky, A. Umnikov, A. Guryanov, E. Dianov, “Optical amplification in 1430-1495 nm range and laser action in Bi-doped fibers”, Opt. Express, 16:21, 16971, 2008.

5.17. В. Трещиков, «Разработка DWDM-системы емкостью 25 Тбит/с», Фотон-экспресс, 2(106), 24-28, 2013.

5.18. M. Sorokina & S. Turitsyn, “Regeneration limit of classical Shannon capacity”, NATURE COMMUNICATIONS, 5:3861, 2014.

5.19. Y. Awaji et al., «Transmission systems using multicor fibers», Optical Fiber Telecommunications VI B: Systems and Networks, Elsevier Inc., 617–651, 2013.

5.20. J. Sakaguchi et al., “Realizing a 36-core, 3-mode fiber with 108 spatial channels,” Proc. OFC, Th5C2, Los Angeles, 2015.

5.21. K. Igarashi et al, “114 space-division-multiplexed transmission over 9.8-km weakly-coupled-6-mode uncoupled-19-core fibers,” Proc. OFC, Th5C2, Los Angeles, 2015.

5.22. H. H. Yu, H. J. Zhang, Y. Wang, Sh. Han, H. Yang, X. Xu, Zh. Wang, V. Petrov, and J. Wang, “Optical orbital angular momentum conservation during the transfer process from plasmonic vortex lens to light,” Sci. Rep. 3, 3191, 2013.

5.23. H. Li etc. „Orbital Angular Momentum (OAM) Vertical-Cavity Surface Emitting Lasers“, Optica, 2, 547, 2015.

5.24. M.-F. Huang et al., «Transmission of 400G dual-carrier DP-16QAM and multi-carrier DP-QPSK signals over regional and long-haul distances with span lengths greater than 200 km», OFC, paper Th4.3, 2013.

5.25. S. Chandrasekhar, X. Liu, «Advances in Tb/s superchanal», Optical Fiber Telecommunications VI B: Systems and Networks. Elsevier Inc., 83–120, 2013.

5.26. А. Новиков, В. Трещиков, С. Плаксин, А. Плоцкий, О. Наний, «Перспективные DWDM системы связи со скоростью 20 Тбит/с на соединение», Фотон-экспресс, 3(99), 34–38, 2012.

5.27. J. Leuthold, W. Freude, «Optical OFDM and Nyquist multiplexing», Optical Fiber Telecommunications VI B: Systems and Networks. Elsevier Inc., 381 — 431, 2013.

5.28. O. Gerstel, M. Jinno, A. Lord, S. Ben Yoo, "Elastic Optical Networking: A New Dawn for the Optical Layer?" IEEE Commun. Mag., 50, s12-s20, 2012.

5.29. S. Frisken, G. Baxter, D. Abakoumov, H. Zhou, I. Clarke, S. Poole, "Flexible and Grid-less Wavelength Selective Switch using LCOS Technology" in Proceedings of OFC/NFOEC 2011, OTuM3.

5.30. P. Wright, A. Lord, L. Velasco, «The Network Capacity Benefits of Flexgrid», ONDM, paper.

5.31. K. Roberts and C. Laperle, "Flexible Transceivers," ECOC '12 Proc., We.3.A.3. 2012.

5.32. J. Prilepsky, S. Derevyanko, K. Blow, I. Gabitov, and S. Turitsyn, "Nonlinear Inverse Synthesis and Eigenvalue Division Multiplexing in Optical Fiber Channels", PRL 113, 013901, 2014.

5.33. S. Turitsyn, «Nonlinear Fourier Transform for Optical Communications», Frontiers in Optics 2015, OSA Technical Digest, FM1E.6.

5.34. B. Smith and F. Kschischang, "Future prospects for FEC in fiberoptic communications," IEEE J. Sel. Topics. Quantum Electron. 16, 5, 1245–1257, 2010.

5.35. L. Schmalen, A. J. de Lind van Wijngaarden, and S. ten Brink, "Forward error correction in optical core and optical access networks," Bell Labs Tech. J, 18, 3, 39-66, 2013.

5.36. B. Djordjevic, M. Cvijetic, L. Xu, and T. Wang, "Proposal for beyond 100 Gb/s optical transmission based on bit-interleaved LDPC-coded modulation," IEEE Photon. Technol. Lett. 19(12), 874–876, 2007.

5.37. K. C. Kao, G. A. Hockham, Proc. IEEE 113, 1151, 1966.

5.38. E. Desurvire, «Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Principles and Applications», Wiley, 1994.

5.39. V. Gainov, N. Gurkin, S. Lukinih, S. Makovejs, S. Akopov, S. Ten, O. Nanii, V. Treshchikov and M. Sleptsov, «Record 500 km unrepeatered 1 Tbit/s (10x100G) transmission over an ultra-low loss fiber», Optics Express. 22, 22308–22313, 2014.

5.40. V. Gainov, N. Gurkin, S. Lukinih, S. Makovejs, S. Akopov, S. Ten, O. Nanii, V. Treshchikov, "Record 500 km unrepeatered 100 Gb s-1 transmission", Laser Phys. Lett. 10, 075107, 2013.

5.41. V. Gainov, N. Gurkin, S. Lukinih, I. Shikhaliev, P. Skvortsov, S. Makovejs, S. Akopov, S. Ten, O. Nanii, V. Treshchikov, «500 km unrepeatered 200 Gbit•s–1 transmission over a G.652-compliant ultra-low loss fiber only», Laser Phys. Lett. 12, 066201(1) — (6), 2015.

5.42. В. Гайнов, В. Конышев, А. Леонов, С. Лукиных, О. Наний, П. Скворцов, В. Трещиков, И. Шихалиев, Р. Убайдуллаев, «Однопролетные оптические линии связи большой протяженности», Прикладная фотоника, 1, 5–22, 2015.

5.43. F. Poletti, N. Wheeler, M. Petrovich, N. Baddela, E. Fokoua, J. Hayes, D. Gray, Z. Li, R. Slavik, and D. Richardson, «Towards high-capacity fibreoptic communications at the speed of light in vacuum,» Nat. Phot. 7, 279–284, 2013.

5.44. C. Doerr, K. Okamoto, «Planar Lightwave Circuits in Fiber-Optic Communications», Optical Fiber Telecommunications V A: Systems and Networks. Elsevier Inc., 269–342, 2008.

5.45. N. Bamiedakis et al., «Integrated and Hybrid Photonics for High-Performance Interconnects», Optical Fiber Telecommunications VI A: Systems and Networks. Elsevier Inc., 458 — 504, 2013.

5.46. Pfeifle et al., Nat. Photon. 8, 375–380, 2014.

5.47. Silva, F. Monticone, G. Castaldi, V. Galdi, A. Alщ, N. Engheta, "Performing Mathematical Operations with Metamaterials", SCIENCE, 343, 2014.

5.48. Giovampaola and N. Engheta, "Digital metamaterials", NATURE MATERIALS, 13, 2014.

5.49. T.J. Xia, G.A. Wellbrock. Commercial 100-Gbit/s Coherent Transmission Systems in Optical Fiber Telecommunications VI B: Systems and Networks. Elsevier Inc., 2013.

5.50. Gottesman, D. Security of quantum key distribution with imperfect devices / D. Gottesman, et al. // Information Theory, 2004. ISIT 2004. Proceedings. International Symposium on.— IEEE.— 2004.— P. 136.

5.51. Gerjuoy, E. Shor`s factoring algorithm and modern cryptography. An illustration of the capabilities inherent in quantum computers / E. Gerjuoy // American journal of physics.— 2005.— v. 73.— №6.— P. 521–540.

5.52. List of complexity classes. [сайт] // URL: https: // complexityzoo.uwaterloo.ca/Complexity_Zoo

5.53. Kleinjung, T. Factorization of a 768-bit RSA modulus / T. Kleinjung, et al. // Advances in Cryptology — CRYPTO 2010.— Springer Berlin Heidelberg.— 2010.— P. 333–350.

5.54. Shor, P.W. Algorithms for quantum computation: Discrete logarithms and factoring / P.W. Shor // Foundations of Computer Science, Proceedings. 35th Annual Symposium on.— IEEE, — 1994.— P. 124–134.

5.55. D-Wave Systems. [сайт] // URL: http://www.dwavesys.com/

5.56. Gubbi, J. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions / J. Gubbi, et al. // Future Generation Computer Systems.— 2013.— v. 29.— №7.— P. 1645–1660.

5.57. Wootters, W.K. A single quantum cannot be cloned / W. K. Wootters, W. H. Zurek // Nature.— 1982.— v. 299.— №5886.— P. 802–803.

5.58. Takesue, H. Quantum teleportation over 100 km of fiber using highly efficient superconducting nanowire single-photon detectors / H. Takesue, et al. // Optica.— 2015.— v. 2.— №10.— P. 832–835.

5.59. Bennett, C.H. Communication via one-and two-particle operators on Einstein-Podolsky-Rosen states / C.H. Bennett, S.J. Wiesner // Physical review letters.— 1992.— v. 69.— №20.— P. 2881.

5.60. Прескилл, Д. Квантовая информация и квантовые вычисления / Д. Прескилл // Ижевск: НИЦ Регулярная и хаотическая динамика.— 2008.

5.61. Grover, L.K. A fast quantum mechanical algorithm for database search / Grover L.K. // Proceedings of the twenty-eighth annual ACM symposium on Theory of computing.— 1996.— P. 212–219.

5.62. Dodd, J. L. Experimental requirements for Grover's algorithm in optical quantum computation / J.L. Dodd, T.C. Ralph, G.J. Milburn // Physical Review A.— 2003.— v. 68.— №4.— P. 042328.

5.63. Big Data. [Электронный ресурс] // URL: http://www.sas.com/en_us/insights/big-data.html

5.64. Wiesner, S. Conjugate coding / S. Wiesner // ACM Sigact News.— 1983.— v. 15.— №1.— v. 78–88.

5.65. Bennett, C. H. Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing / C. H. Bennett // International Conference on Computer System and Signal Processing, IEEE.— 1984.— P. 175–179.

5.66. Bennett, C. H. Quantum cryptography using any two nonorthogonal states / C. H. Bennett // Physical Review Letters.— 1992.— v. 68.— №21.— P. 3121.

5.67. Patel, K. A. Quantum key distribution for 10 Gb/s dense wavelength division multiplexing networks / K. A. Patel, et al. // Applied Physics Letters.— 2014.— v. 104.— №5.— P. 051123.

5.68. Deutsch, D. Quantum theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer / D. Deutsch // Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences.— The Royal Society.— 1985.— v. 400.— №1818.— P. 97–117.

5.69. Korzh, B. Provably secure and practical quantum key distribution over 307 km of optical fibre / B. Korzh, et al. // Nature Photonics.— 2015.— v. 9.— №3.— v. 163–168.

5.70. Patel, K. A. Coexistence of high-bit-rate quantum key distribution and data on optical fiber / K.A. Patel, et al. // Physical Review X.— 2012.— v. 2.— №4.— P. 041010.

5.71. Elliott, C. Building the quantum network / C. Elliott // New Journal of Physics.— 2002.— v. 4.— №1.— P. 46.

5.72. Id Quantique. [сайт] // URL: http://www.idquantique.com/photon-counting/clavis2-qkd-platform/

5.73. Shor, P. W. Simple proof of security of the BB84 quantum key distribution protocol / P.W. Shor, J. Preskill // Physical review letters.— 2000.— v. 85.— №2.— P. 441.

5.74. Inoue, K. Differential phase-shift quantum key distribution / K. Inoue, E. Waks, Y. Yamamoto // Photonics Asia 2002.— International Society for Optics and Photonics.— 2002.— P. 32–39.

5.75. Stucki, D. Fast and simple one-way quantum key distribution / D. Stucki, et al. // Applied Physics Letters.— 2005.— v. 87.— №19.— P. 194108.

5.76. Wang, S. 2 GHz clock quantum key distribution over 260 km of standard telecom fiber / S. Wang, et al. // Optics letters.— 2012.— v. 37.— №6.— P. 1008–1010.

5.77. Yuen, H. P. Noise in homodyne and heterodyne detection / H. P. Yuen, V.W.S. Chan // Optics Letters.— 1983.— v. 8.— №3.— P. 177–179.

5.78. Grosshans, F. Continuous variable quantum cryptography using coherent states / F. Grosshans, P. Grangier // Physical review letters.— 2002.— v. 88.— №5.— P. 057902.

5.79. Jouguet, P. Experimental demonstration of long-distance continuous-variable quantum key distribution / P. Jouguet, et al. // Nature Photonics.— 2013.— v. 7.— №5.— P. 378–381.

5.80. Mizutani, A. Measurement-device-independent quantum key distribution for Scarani-Acin-Ribordy-Gisin 04 protocol / A. Mizutani, et al. // Scientific reports.— 2014.— v. 4.

5.81. Xu, F. Long distance measurement-device-independent quantum key distribution with entangled photon sources / F. Xu, et al. // Applied Physics Letters.— 2013.— v. 103.— №6.— P. 061101.

5.82. Muller, A. Plug and play" systems for quantum cryptography / A. Muller, et al. // Applied Physics Letters.— 1997.— v. 70.— № 7.— P. 793–795.

5.83. Merolla, J. M. Phase-modulation transmission system for quantum cryptography / J. M. Merolla, et al. // Optics letters.— 1999.— v. 24.— №2.— P. 104–106.

5.84. Merolla, J. M. Single-photon interference in sidebands of phase-modulated light for quantum cryptography / J. M. Merolla, et al. // Physical review letters.— 1999.— v. 82.— № 8.— P. 1656.

5.85. Guerreau, O. L. Long-distance QKD transmission using single-sideband detection scheme with WDM synchronization / O. L. Guerreau, et al. // Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE.— 2003.— v. 9.— №6.— P. 1533–1540.

5.86. Ortigosa-Blanch, A. Subcarrier multiplexing optical quantum key distribution / A. Ortigosa-Blanch, J. Capmany // Physical Review A.— 2006.— v. 73.— №2.— P. 024305.

5.87. Mora, J. Experimental demonstration of subcarrier multiplexed quantum key distribution system / J. Mora, et al. // Optics letters.— 2012.— v. 37.— №11.— P. 2031–2033.

5.88. Gleim, A.V. Secure polarization-independent subcarrier quantum key distribution in optical fiber channel using BB84 protocol with a strong reference / A.V. Gleim, et al. // Optics Express.— 2016.— v. 24.— №3.— P. 2619–2633.

5.89. Yoshino, K. High-speed wavelength-division multiplexing quantum key distribution system / K. Yoshino, et al. // Optics letters.— 2012.— v. 37.— №2.— P. 223–225.

5.90. Mora, J. Simultaneous transmission of 20x2 WDM/SCM-QKD and 4 bidirectional classical channels over a PON / J. Mora, et al. // Optics Express.— 2012.— v. 20.— №15.— P. 16358–16365.

5.91. Duan, L.M. Long-distance quantum communication with atomic ensembles and linear optics / L.M. Duan, et al. // Nature.— 2001.— v. 414.— №6862.— P. 413–418.

5.92. Kuzmich, A. Generation of nonclassical photon pairs for scalable quantum communication with atomic ensembles / A. Kuzmich, et al. // Nature.— 2003.— v. 423.— №6941.— P. 731–734.

5.93. Chou, C. W. Measurement-induced entanglement for excitation stored in remote atomic ensembles / C. W. Chou, et al. // Nature.— 2005.— v. 438.— №7069.— P. 828–832.

5.94. Chou, C. W. Functional quantum nodes for entanglement distribution over scalable quantum networks / C.W. Chou, et al. // Science.— 2007.— v. 316.— №5829.— P. 1316–1320.

5.95. Simon, C. Quantum memories / C. Simon, et al. // The European Physical Journal D.— 2010.— v. 58.— №1.— P. 1–22.

5.96. Azuma, K. All-photonic quantum repeaters / K. Azuma, K. Tamaki, H. K. Lo // Nature communications.— 2015.— v. 6.

5.97. Peev, M. The SECOQC quantum key distribution network in Vienna / M. Peev, et al. // New Journal of Physics.— 2009.— v. 11.— №7.— P. 075001.

5.98. Stucki, D. Long-term performance of the SwissQuantum quantum key distribution network in a field environment / D. Stucki, et al. // New Journal of Physics.— 2011.— v. 13.— №12.— P. 123001.

5.99. Dianati, M. Architecture and protocols of the future European quantum key distribution network / M. Dianati, et al. // Security and Communication Networks.— 2008.— v. 1.— №1.— P. 57–74.

5.100. Xu, F. X. Field experiment on a robust hierarchical metropolitan quantum cryptography network / F. X. Xu, et al. // Chinese Science Bulletin.— 2009.— v. 54.— №17.— P. 2991–2997.

5.101. Wang, S. Field and long-term demonstration of a wide area quantum key distribution network / S. Wang, et al. // Optics express.— 2014.— v. 22.— №18.— P. 21739–21756.

5.102. Sasaki, M. Field test of quantum key distribution in the Tokyo QKD Network / M. Sasaki, et al. // Optics Express.— 2011.— v. 19.— №11.— P. 10387–10409.

5.103. Dixon, A. R. High speed prototype quantum key distribution system and long term field trial / A.R. Dixon, et al. // Optics express.— 2015.— v. 23.— №6.— P. 7583–7592.

5.104. Глейм, А. В. Создание квантовой сети Университета ИТМО / А. В. Глейм, и др. // Сборник трудов VIII международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики — 2014».— СПб: ИТМО.— 2014.— С. 3-4.

5.105. Lemos, G. B. Quantum imaging with undetected photons / G. B. Lemos, et al. // Nature.— 2014.— v. 512.— №7515.— P. 409-412.

5.106. Clarke, P. J. Experimental demonstration of quantum digital signatures using phase-encoded coherent states of light / P. J. Clarke, et al. // Nature communications.— 2012.— v. 3.— P. 1174.

5.107. Ekert, A. K. Quantum cryptography based on Bell's theorem / A. K. Ekert // Physical review letters.— 1991.— v. 67.— №6.— P. 661.

5.108. Bennett, C. H. Teleporting an unknown quantum state via dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen channels / C.H. Bennett, et al. // Physical review letters.— 1993.— v. 70.— №13.— P. 1895.

5.109. Boschi, D. Experimental realization of teleporting an unknown pure quantum state via dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen channels / D. Boschi, et al. // Physical Review Letters.— 1998.— v. 80.— №6.— P. 1121.

5.110. Bouwmeester, D. Experimental quantum teleportation / D. Bouwmeester,etal. //Nature.—1997.—v. 390.—№6660.—P. 575–579.

5.111. Ma, X. S. Quantum teleportation over 143 kilometres using active feed-forward / X. S. Ma, et al. // Nature.— 2012.— v. 489.— №7415.— P. 269–273.

5.112. Нильсен, М. Квантовые вычисления и квантовая информация / М. Нильсен, И. Чанг // М: Мир, — 2006.

5.113. Barreiro, J. T. Beating the channel capacity limit for linear photonic superdense coding / J. T. Barreiro, T.C. Wei, P. G. Kwiat // Nature physics.— 2008.— v. 4.— №4.— P. 282–286.

5.114. Lounis, B. Single-photon sources / B. Lounis, M. Orrit // Reports on Progress in Physics.— 2005.— v. 68.— №5.— P. 1129.

5.115. Lukishova, S.G. Single photon sources for secure quantum communication / S.G. Lukishova // Fundamentals of Laser Assisted Micro- and Nanotechnologies.— 2013.— P. 90650C (1-16).

5.116. Lukishova, S. G. Resonance in quantum dot fluorescence in a photonic bandgap liquid crystal host / S.G. Lukishova, et al. // Optics letters.— 2012.— v. 37.— №7.— P. 1259–1261.

5.117. Aharonovich, I. Diamond photonics / I. Aharonovich, A. D. Greentree, S. Prawer // Nature Photonics.— 2011.— v. 5.— №7.— P. 397–405.

5.118. Jechow, A. High brightness, tunable biphoton source at 976 nm for quantum spectroscopy / A. Jechow, A. Heuer, R. Menzel // Optics express.— 2008.— v. 16.— №17.— P. 13439–13449.

5.119. Fiorentino, M. Spontaneous parametric down-conversion in periodically poled KTP waveguides and bulk crystals / M. Fiorentino, et al. // Optics Express.— 2007.— v. 15.— №12.— P. 7479–7488.

5.120. QCV SPS 1.01 True single photon source. [Электронный ресурс] // URL: http: // qcvictoria.com/New-Products

5.121. Lo, H.K. Decoy state quantum key distribution / H.K. Lo, X. Ma, K. Chen // Physical review letters.— 2005.— v. 94.— №23.— P. 230504.

5.122. Afzelius, M. Photon-echo quantum memory in solid-state systems / M. Afzelius, et al. // Laser & Photonics Reviews.— 2010.— v. 4.— №2.— P. 244–267.

5.123. Moiseev, S.A. Optical quantum memory with generalized time-reversible atom-light interaction / S.A. Moiseev, W. Tittel // New Journal of Physics.— 2011.— v. 13.— №6.— P. 063035.

5.124. Kyaw, T. H. Scalable quantum memory in the ultrastrong coupling regime / T.H. Kyaw, et al. // Scientific reports.— 2015.— v. 5.

5.125. Bertet, P. Towards a spin-ensemble quantum memory for superconducting qubits / P. Bertet, et al. // APS Meeting Abstracts.— 2013.— v. 1.— P. 41003.

5.126. Afzelius, M. Photon-echo quantum memory in solid-state systems / M. Afzelius, et al. // Laser & Photonics Reviews.— 2010.— v. 4.— №2.— P. 244–267.

5.127. Berloff, N. G. Modeling quantum fluid dynamics at nonzero temperatures / N. G. Berloff, M. Brachet, N.P. Proukakis // Proceedings of the National Academy of Sciences.— 2014.— v. 111.— № Supplement 1. —P. 4675-4682.

5.128. Kudyshev, Z. Effect of phase mismatch on second-harmonic generation in negative-index materials / Z. Kudyshev, I. Gabitov, A. Maimistov // Physical Review A.— 2013.— v. 87.— №6.— P. 063840.

5.129. Luis, A. A quantum description of the beam splitter / A. Luis, L. L. Sänchez-Soto // Quantum and Semiclassical Optics: Journal of the European Optical Society Part B.— 1995.— v. 7.— №2.— P. 153.

5.130. Ivanova, A. E. On the possibility of using optical y-splitter in quantum random number generation systems based on fluctuations of vacuum / A. E. Ivanova, et al. // Nanosystems: physics, chemistry, mathematics.— 2015.— v. 6.— №1.— P. 95–99.

5.131. Tsang, M. Quantum theory of optical temporal phase and instantaneous frequency / M. Tsang, J.H. Shapiro, S. Lloyd // Physical Review A.— 2008.— v. 78.— №5.— P. 053820.

5.132. Kumar, P. Evolution of quantum states in an electro-optic phase modulator / P. Kumar, A. Prabhakar // Quantum Electronics, IEEE Journal of.— 2009.— v. 45.— №2.— P. 149–156.

5.133. Carolan, J. Universal linear optics / J. Carolan, et al. // Science.— 2015.— v. 349.— №6249.— P. 711–716.

5.134. Sänchez-Burillo, E. Nonlinear quantum optics in the (ultra) strong light-matter coupling / E. Sänchez-Burillo, et al. // Faraday discussions.— 2015.— v. 178.— P. 335–356.

5.135. Metcalf, B. J. Quantum teleportation on a photonic chip / B. J. Metcalf, et al. // Nature Photonics.— 2014.— v. 8.— №10.— P. 770–774.

5.136. Scarani, V. The security of practical quantum key distribution / V. Scarani, et al. // Reviews of modern physics.— 2009.— v. 81.— №3.— P. 1301.

5.137. Brun, T. A. A simple model of quantum trajectories / T. A. Brun // American Journal of Physics.— 2002.— v. 70.— №7.— P. 719–737.

5.138. Eisaman, M.D. Invited review article: Single-photon sources and detectors / M.D. Eisaman, et al. // Review of Scientific Instruments.— 2011.— v. 82.— №7.— P. 071101.

5.139. Maingault, L. Spectral dependency of superconducting single photon detectors / L. Maingault, M. Tarkhov, G. Goltsman, et al. // Journal of Applied Physics.— 2010.— v. 107.— №11.— P. 116103.

5.140. Gurovich, B. A. The use of ion irradiation for converting superconducting thin-film NbN into niobium oxide Nb2O5 / B.A. Gurovich, M. Tarkhov, et al. // Nanotechnologies in Russia.— 2015.— v. 10.— №7-8.— P. 530–536.

5.141. Korzh, B. Free-running InGaAs single photon detector with 1 dark count per second at 10% efficiency / B. Korzh, et al. // Applied Physics Letters.— 2014.— v. 104.— №8.— P. 081108.

5.142. Makarov, V. Controlling passively quenched single photon detectors by bright light / V. Makarov // New Journal of Physics.— 2009.— v. 11.— №6.— P. 065003.

5.143. Ralph, T.C. Linear optical controlled-NOT gate in the coincidence basis / T. C. Ralph, et al. // Physical Review A.— 2002.— v. 65.— №6.— P. 062324.

5.144. Bernon, S. Manipulation and coherence of ultra-cold atoms on a superconducting atom chip / S. Bernon, et al. // Nature communications.— 2013.— v. 4.

5.145. Li, G. Crossed vortex bottle beam trap for single-atom qubits / G. Li, et al. // Optics letters.— 2012.— v. 37.— №5.— P. 851–853.

5.146. Fang, W. Q. Exact magnetic field control of nitrogen-vacancy center spin for realizing fast quantum logic gates / W. Q. Fang, B. G. Liu // Physical Review B.— 2015.— v. 92.— №17.— P. 174423.

5.147. Zwanenburg, F.A. Silicon quantum electronics / F. A. Zwanenburg, et al. // Reviews of modern physics.— 2013.— v. 85.— №3.— P. 961.

5.148. Knill, E. A scheme for efficient quantum linear optics / E. Knill, R. Laflamme, G. J. Milburn // Nature.— 2001.— v. 409.— №6816.— P. 46-52.

5.149. MagiQ. [сайт] // URL: http://www.magiqtech.com

5.150. SequreNet. [сайт] // URL: http://www.sequrenet.com

5.151. Toshiba.[сайт] //URL:http://www.toshiba.eu/eu/Cambridge-Research-Laboratory/Quantum-Information-Group/Quantum-Key-Distribution/Toshiba-QKD-system/

5.152. M. Gu, X. Li, and Y. Cao, Optical storage arrays: a perspective for future big data storage // Light: Sci. & App. 3. e177. 1-11. 2014.

5.153. Lei Wang, Ci-Hui Yang, Shan Gai and Jing Wen. Current Status and Future Prospects of Conventional Recording Technologies for Mass Storage Applications // Current Nanoscience. 2014. Vol. 10. No. 5. P. 638–659.

5.154. J. Toigo, The Z (ettabyte) apocalypse // Storage. December. 5. 2015.

5.155. T. D. Milster, Prospects and philosophy for high-density optical recording // Proc. of SPIE. 9201. 92010O. 2014.

5.156. S. Bhargava, Heat-Assisted Magnetic Recording: Fundamental Limits to Inverse Electromagnetic Design // EECS. 106. 2015.

5.157. K. Anderson, M. Ayres, B. Sissom, F. Askham, Holographic Data Storage: Rebirthing a Commercialization Effort // Proc. of SPIE. 9006.90060C. 1-11. 2014.

5.158. K. Anderson, M. Ayres, F. Askham, B. Sissom, Holographic Data Storage: Science Fiction or Science Fact // Proc. of SPIE. 9201. 920102. 1-8. 2014.

5.159. Дж. Кобаясиб, Ю. Уезу, Оптическая память, принципы записи и используемые материалы // АН СССР, Сиб. отд. Автометрия. №1. 4-16.1978.

5.160. H. Li, J. Wang, H. Lin, L. Xu, W. Xu, R. Wang, Y. Song, D. Zhu, Amplification of Fluorescent Contrast by Photonic Crystals in Optical Storage // Adv. Mater. 22. 1237–1241.2010.

5.161. V. G. Chigrinov, H. S. Kwok, Liquid crystal photoalignment: history and future // Proc. of SPIE. 6487. 64870F. 2007.

5.162. M. H. Kryder, E. C. Gage, T. W. McDaniel, W. A. Challener, R. E. Rottmayer, G. Ju, Y.-T. Hsia, and M. F. Erden, Heat Assisted Magnetic Recording // IEEE.96. 11. 1810–1835. 2008.

5.163.

5.164. Y. Hu, J. Ma, Y. Chen, J. Li, W. Huang, J. Chu, Fast Bits Recording in Photoisomeric Polymers by Phase-modulated Femtosecond Laser // IEEE Photonics Tech. Lett. 1041–1135.2013.

5.165. V. F. Traven, D. A. Cheptsov, Media with photoinduced irreversible fluorescence // Heterocycl. Commun. 21.3.133-143. 2015.

5.166. J. F. Heanue, M. C. Bashaw, L. Hesselink, Volume Holographic Storage and Retrieval of Digital Data // Science. 265.749-753. 1994.

5.167. Cokgor, F. B. Mc Cormick, A. S. Dvornikov, M. Wang, N. Kim, K. Koblentz, S. C. Esener, P. M. Rentzepis. Multilayer disk recording using 2-photon absorption and the numerical simulation of the recording process // Proc. SPIE. 3109. 182–186. 1997.

5.168. S. Kawata, Y. Kawata. Three-DimensionalOptical Data Storage Using Photochromic Materials // Chem. Rev. 100. 1777-1791. 2000.

5.169. A. S. Dvornikov, I. Cokgor, M. Wang, F. B. Mc Cormick, S. C. Esener, P. M. Rentzepis. Materials and systems for two photon 3-D ROM devices // IEEE Transaction. Part A. 20(2). 203-212. 1997.

5.170. A. S. Dvomikov, E. P. Walker, Rentzepis. Two-Photon Three-Dimensional Optical Storage Memory // J. Phys.Chem.A. 113(49). 13633–13644. 2009.

5.171. K. Ogawa, Two-Photon Absorbing Molecules as Potential Materials for 3D Optical Memory // Appl. Sci. 4. 1-18. 2014.

5.172. J. P. Gaspard. Hume-Rothery rule in V-VI compounds // Solid State Commun. 84. 839-842. 1992.

5.173. Whittal J. 1990.4n+2 Systems: Fulgides. In: Photochromism: Molecules and Systems. (Eds. H. Dьrr, H. Bouas-Laurent). Amsterdam, Elsevier: 467–492.

5.174. V. A. Barachevsky, Photochromism of aryloxyquinones // Ibid.246,95-102,1994

5.175. S. L. Gilat, S. H. Kawai, J.-M. Lehn. Light-triggered electrical and optical switches // Ibid. 246. 323 — 326. 1994.

5.176. S. Dvornikov, P.M. Rentzepis, Processes and materials for two — photon volume optical memories // Opt. Mem. Neur. Networks 3. 75–86. 1994.

5.177. R. E. Rottmayer, S. Batra, D. Buechel, W. A. Challener, J. Hohlfeld, Y. Kubota, L. Li, B. Lu, C. Mihalcea, K. Mountfield, K. Pelhos, C. Peng, T. Rausch, M. A. Seigler, D. Weller, X. M. Yang, Heat-Assisted Magnetic Recording // IEEE Trans. on Mag. 42. 10.2417-2421.2006.

5.178. R. H. Victora, S. Wang, Simulation of Expected Areal Density Gain for Heat Assisted Magnetic Recording Relative to Other Advanced Recording Schemes // IEEE Tran.Mag. 51.11.2015.

5.179. J. J. M. Ruigrok, R. Coehoorn, S. R. Cumpson, H. W. Kesteren, Disk recording beyond 100 Gb/in.2 : Hybrid recording? (invited) // J. Appl. Phys. 87. 9. 5398–5605. 2000.

5.180. Q. Wu, Y. Kubota, T. Klemmer, T. Rausch, C. Peng, Y. Peng, D. Karns, X. Zhu, Y. Ding, Eric K.C. Chang, Y. Zhao, H. Zhou, K. Gao, J.-U. Thiele, M. Seigler, G. Ju, E. Gage, HAMR Areal Density Demonstration of 1+Tbpsi on Spinstand // IEEE Trans. on Mag.49. 2. 779–783. 2013.

5.181. R. Beschizza. Inside Seagate's R&D Labs // «Wired», 02.01.2007.

5.182. H. Bethe, Theory of diffraction by small holes // Phys. Rev. 66. 163-182. 1944.

5.183. Partovi, D. Peale, M. Wuttig, C. A. Murray, G. Zydzik, L. Hopkins, K. Baldwin, W. S. Hobson, J. Wynn, J. Lopata, L. Dhar, R. Chichester, and J. H.-J. Yeh,,High-power laser light source for near-field optics and its application to high-density optical data storage // Appl. Phys. Lett., vol. 75, pp. 1515-1517, 1999.

5.184. F. Chen, A. Itagi, J. A. Bain, D. D. Stancil, T. E. Schlesinger, L. Stebounova, G. C. Walker, and B. B. Akhremitchev, Imaging of optical field confinement in ridge waveguides fabricated on very-small-aperture laser // Appl. Phys. Lett., vol. 83, pp. 3245-3247, 2003.

5.185. E. Cubukcu, E. A. Kort, K. B. Crozier, and F. Capasso, Plasmonic laser antenna // Appl. Phys. Lett. 89. 120. 2006.

5.186. N. J. Gokemeijer, W. A. Challener, E. Gage, Y.-T. Hsia, G. Ju, D. Karns, D. Karns, L. Li, B. Lu, K. Pelhos, C. Peng, R. E. Rottmayer, X. Yang, H. Zhou, T. Rausch, and M. Seigler, Challenges in heat assisted magnetic recording // in MORIS Tech. Dig., Pittsburgh, PA, 1–2. 2007.

5.187. Seagate Reminds People That 10TB Drives Are Coming This Year [Электронный ресурс] // URL: http: // news.softpedia.com/news/seagate-reminds-people-that-10tb-drives-are-coming-this-year-491637.shtml

5.188. J. S. Meena, S. M. Sze, U. Chand, T.-Y. Tseng, Overview of emerging nonvolatile memory technologies // Nano. Res. Lett. 9. 526. 1–33. 2014.

5.189. B. Kim, Y. Song, S. Ahn, Y. Kang, H. Jeong, D. Ahn, S. Nam, G. Jeong, C. Chung, Current Status and Future Prospect of Phase Change Memory // IEEE. 279 — 282. 2011.

5.190. S.R. Ovshinsky, Reversible electrical switching phenomena in disordered structures // Phys. Rev. Lett. 21. 1450–1453. 1968.

5.191. S. Hudgens, B.Johnson, Overview of Phase-Change Chalcogenide Nonvolatile Memory Technology // 29. 11. 829–832. 2004.

5.192. K. B. Borisenko, J. Shanmugam, B. A. Williams, P. Ewart, B. Gholipour, D. W. Hewak, R. Hussain, T. Javorfi, G. Siligardi, A. I. Kirkland, Photo-induced optical activity in phase change memory materials // Sci. Rep. 5.8770. 2015.

5.193. L. Wang, C.-H. Yang, J. Wen, Physical Principles and Current Status of Emerging Non-Volatile Solid State Memories // Electron. Mater. Lett. 11. 4. 505-543.2015.

5.194. P. Wong, S. Raoux, S. Kim, J. Liang, J. P. Reifenberg, B. Rajendran, M. Asheghi, K. E. Goodson, Phase Change Memory // IEEE. 98. 12. 2201-2228. 2010.

5.195. Chen, M., Rubin, K. A. & Barton, R. W. Compound materials for reversible, phase-change opticaldata storage // Appl. Phys. Lett. 49. 502-504. 1986.

5.196. Yamada, N., Takenaga, M. & Takao, M. Te-Ge-Sn-Au phase-change recording film for optical disk // Proc. SPIE 695, 79-85 1986.

5.197. Ohno, E., Yamada, N., Kurumizawa, T., Kimura, K. & Takao, M. Tegesnau alloys for phase-change type optical disk memories // J. Appl. Phys. Part 1 28. 1235-1240. 1989.

5.198. Wuttig, M. et al. The role of vacancies and local distortions in the design of new phase-change materials // Nature Mater. 6. 122–128. 2007.

5.199. П. Е. Твердохлеб, Голография и оптическая память // Сборник трудов Всероссийского семинара «Юрий Николаевич Денисюк — основоположник отечественной голографии».— ФТИ им. А. Ф. Иоффе.— с. 65–77.— 2007.

5.200. Holographic Data Storage Technology // IBM Journal of Research and Development. 44(3). 2000.

5.201. M. R. Ayres, K. Anderson, F. Askham, B. Sissom, A. C. Urness, Holographic data storage at 2+ Tbit/in.2 // Proc. of SPIE. 9386. 93860G. 1–7. 2015.

5.202. C. Gu, Holographic Memory for High Density Data Storage and High Speed Pattern Recognition // Proc. of SPIE. 4929. 198–208. 2002.

5.203. K. Shimada, T. Ide, T. Shimano, K. Anderson, K. Curtisd, New optical architecture for holographic data storage system compatible with Blu-Ray Disc™ system // Opt.Eng. 53(2). 025102. 2014.

5.204. M. E. Thomas. Atomic Holographic NanoTechnology Sets Pace for the Future [Электронный ресурс] // URL: http://www.prweb.com/releases/2003/07/prweb72763.htm

5.205. G. T. Sincerbox, Selected papers on Holographic Storage // SPIE Milestone Series, Vol. MS 95, SPIE, Bellingham, Wash., 1994.

5.206. C. Simon, M. Afzelius, J. Appel, A. Boyer de la Giroday, S. J. Dewhurst, N. Gisin, C. Y. Hu, F. Jelezko, S. Kröll, J. H. Muller, J. Nunn, E. S. Polzik, J. G. Rarity, H. De Riedmatten, W. Rosenfeld, A. J. Shields, N. Sköld, R. M. Stevenson, R. Thew, I. A. Walmsley, M. C. Weber, H. Weinfurter, J. Wrachtrup, and R.J. Young, Quantum memories // Eur. Phys. J. 58. 1–22. 2010.

5.207. G. Kurizkia, P. Bertetb, Y. Kubob, K. Мшlmerc, D. Petrosyand, P. Rablf, J. Schmiedmayerf, Quantum technologies with hybrid systems // PNAS. 112. 13. 3866–3873.2014.

5.208. B. M. Terhal, Quantum error correction for quantum memories // Rev. Mod. Phys. 87. 307–347. 2015.

5.209. J. R. Wootton, Quantum memories and error correction // J. Mod. Opt. 59. 20. 1717-1738. 2012.

5.210. V. Parigi, V. D'Ambrosio, C. Arnold, L. Marrucci, F. Sciarrino, J.Laurat, Storage and retrieval of vector beams of light in a multiple-degree-of-freedom quantum memory // Nat. Comm. 6. 7706. 2015.

5.211. J. Appel, E. Figueroa, D. Korystov, M. Lobino, A. I. Lvovsky, Quantum Memory for Squeezed Light // Phys. Rev. Lett. 100. 093602. 2008.

5.212. Z. Zheng, O. Mishina, N. Treps, and C. Fabre, Atomic quantum memory for multimode frequency combs // Phys. Rev. A 91. 031802(R). 2015.

5.213. W. Tittell, M. Afzelius, T. Chaneliere, R. L. Cone, S. Kröll, S. A. Moiseev, M.Sellars, Photon-echo quantum memory in solid-state systems // Laser & Photon. Rev.4. 2. 244–268. 2010.

5.214. Miao-Xin Wu, Ming-Feng Wang and Yi-Zhuang Zheng, Photon-echo-based quantum memory for optical squeezed states // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 48. 155501. 1-7. 2015.

5.215. M. P. Hedges, J. J. Longdell, Y. Li, M. J. Sellars, // 465. 1052–1056. 2010.

5.216. Alexander, A. L., Longdell, J. J., Sellars, M. J. & Manson, N. B. Photon echoes produced by switching electric fields // Phys. Rev. Lett. 96. 043602. 2006.

5.217. Hetet, G., Longdell, J. J., Alexander, A. L., Lam, P. K. & Sellars, M. J. Electro-optic quantum memory for light using two-level atoms // Phys. Rev. Lett. 100. 023601. 2008.

5.218. Lauritzen, B. et al. Telecommunication-wavelength solid-state memory at the single photon level // Phys. Rev. Lett. 104. 080502. 2010.

5.219. Appel, J., Figueroa, E., Korystov, D., Lobino, M. & Lvovsky, A. Quantum memory for squeezed light // Phys. Rev. Lett. 100. 093602. 2008.

5.220. V. Turukhin, V. S. Sudarshanam, M. S. Shahriar, J. A. Musser, B. S. Ham, and P. R. Hemmer, Observation of ultraslow and stored light pulses in a solid // Phys.Rev.Lett. 88. 023602. 2002.

5.221. Liu, Z. Dutton, C. H. Behroozi, and L. V. Hau, Observation of coherent optical information storage in an atomic medium using halted light pulses // Nature 409. 490–493. 2001.

5.222. L. M. Duan, M. D. Lukin, J. I. Cirac, and P. Zoller, Long-distance quantum communications with atomic ensembles and linear optics // Nature 414. 413-418. 2001.

5.223. H.-J. Briegel, W. Dür, J. I. Cirac, and P. Zoller, Quantum repeaters: the role of imperfect local operations in quantum communication // Phys. Rev. Lett. 81. 5932-5935. 1998.

5.224. N. A. Kurnit, I. D. Abella, and S. R. Hartmann, Observation of a photon echo // Phys. Rev. Lett. 13. 567-568. 1964.

5.225. N. Sangouard, C. Simon,M. Afzelius,and N. Gisin, Analysis of a quantum memory for photon based on controlled reversible inhomogeneous broadening // Phys. Rev. A 75, 032327, 2007.

5.226. S. A. Moiseev and S. Kroll, Complete reconstruction of the quantum state of a single-photon wave packet absorbed by a Doppler-broadened transition // Phys. Rev. Lett. 87. 173601. 2001.

5.227. M. Nilsson and S. Kroll, Solid state quantum memory using complete absorption and re-emission of photons by tailored and externally controlled inhomogeneous absorption profiles // Opt. Commun. 247. 393-403. 2005.

5.228. R. M. Macfarlane and R. M. Shelby, Coherent transient and holeburning spectroscopy of rare earth ions in solids, in Spectroscopy of Solids Containing Rare Earth Ions, A. Kaplyanskii and R. M. Macfarlene, eds. (North-Holland, 1987).

5.229. D. S. Kim, J. Shah, T. C. Damen, W. Schafer, F. Jahnke, S. Schmitt-Rink, and K. Kohler, Unusually slow temporal evolution of femtosecond four-wave mixing signals in intrinsic GaAa quantum wells: direct evidence for the dominance ofinteraction effect // Phys. Rev. Lett. 69, 2725-2728, 1992.

5.230. E.L. Hahn, Spin echoes // Phys. Rev. 80. 580-594. 1950.

5.231. C. W. Thiel, T. Bottger, R.L.Cone, rare-earth-doped materials for applications in quantum information storage and singal prossesing // J. of Lum. 131. 353-361. 2011.

5.232. J. Stajic. The Future of Quantum Information Processing. Science, 339(6124):1163-1163, March 2013

5.233. J. A. Zayats, S. Maier. Active Plasmonics and Tuneable Plasmonic Metamaterials. In: John Wiley & Sons. 2013.

5.234. M. A. Nielsen, I. Chuang, and L. K Grover. Quantum Computation and Quantum Information. American Journal of Physics, 70(5):558-559, 2002.

5.235. Peter W. Shor. Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer. SIAM Journal on Computing, 26(5): 1484–1509, October 1997.

5.236. L. M. K. Vandersypen, M. Steffen, G. Breyta, C. S. Yannoni, M. H. Sherwood and I. L. Chuang. Experimental realization of Shor's quantum factoring algorithm using nuclear magnetic resonance. Nature, 414: 883-887, 2001.

5.237. Richard P. Feynman. Simulating physics with computers. International Journal of Theoretical Physics, 21(6-7):467-488, June 1982.

5.238. S. Lloyd. Universal Quantum Simulators. Science, 273: 1073, 1996.

5.239. P. Hauke, F. M. Cucchietti, L. Tagliacozzo, I. Deutsch, and M. Lewenstein. Can one trust quantum simulators? Rep. Prog. Phys. 75, 082401 (2012).

5.240. S. Boixo, T. F. Raznnow, S. V. Isakov, Z. Wang, D. Wecker, D. A. Lidar, J. M. Martinis, and M. Troyer. Evidence for quantum annealing with more than one hundred qubits. Nature Physics, 10(3):218-224, February 2014.

5.241. David P. Divincenzo. The Physical Implementation of Quantum Computation. Fortschritte der Physik, 48:771-783, 2000.

5.242. B. P. Lanyon, C. Hempel, D. Nigg, M. Muller, R. Gerritsma, F. Zahringer, P. Schindler, J. T. Barreiro, M. Rambach, G. Kirchmair, M. Hennrich, P. Zoller, R. Blatt, and C. F. Roos. Universal Digital Quantum Simulation with Trapped Ions. Science, 334(6052):57–61, October 2011.

5.243. J. I. Cirac and P. Zoller. Quantum Computation with Cold Trapped Ions. Phys. Rev. Lett. 74, 4091 (1995).

5.244. P. Schindler, D. Nigg, Th. Monz, J. T. Barreiro, E. Martinez, S. X. Wang, S. Quint, M. F. Brand, V. Nebendahl, Ch. F. Roos, M. Chwalla, M. Hennrich, and R. Blatt. A quantum information processor with trapped ions. New J. Physics 15, 123012 (2013).

5.245. R. Blatt and C. F. Roos. Quantum simulations with trapped ions. Nature Phys. 8, 277 (2012).

5.246. M. Saffman, T. G. Walker, and K. Mülmer. Quantum information with Rydberg atoms. Rev. Mod. Phys. 82, 2313 (2010).

5.247. T. Esslinger. Fermi-Hubbard Physics with Atoms in an Optical Lattice. Annual Review of Condensed Matter Physics 1, 129 (2010).

5.248. J. F. Sherson, C. Weitenberg, M. Endres, M. Cheneau, I. Bloch, and S. Kuhr. Single-atom-resolved fluorescence imaging of an atomic Mott insulator. Nature 467, 68 (2010).

5.249. Y. Colombe, T. Steinmetz, G. Dubois, F. Linke, D. Hunger, and J. Reichel. Strong atom-field coupling for Bose-Einstein condensates in an optical cavity on a chip. Nature 450, 272 (2007)

5.250. J. L. O'Brien. Optical Quantum Computing. Science 318, 1567 (2007).

5.251. T. E. Northup and R. Blatt. Quantum information transfer using photons. Nature Photonics 8, 356 (2014).

5.252. M. P. Hedges, J. J. Longdell, Y. Li, and M. J. Sellars. Efficient quantum memory for light. Nature 465, 1052 (2010).

5.253. R. Hanson and D. D. Awschalom. Coherent manipulation of single spins in semiconductors. Nature 453, 1043 (2008).

5.254. J. J. Pla, K. Y. Tan, J. P. Dehollain, W. H. Lim, J. J. L. Morton, F. A. Zwanenburg, D. N. Jamieson, A. S. Dzurak, and A. Morello. High-fidelity readout and control of a nuclear spin qubit in silicon. Nature 494, 313 (2013).

5.255. G. Waldherr, Y. Wang, S. Zaiser, M. Jamali, T. Schulte-Herbrüggen, H. Abe, T. Ohshima, J. Isoya, J. F. Du, P. Neumann, J. Wrachtrup. Quantum error correction in a solid-state hybrid spin register. Nature 506, 204 (2014).

5.256. J. D. Teufel, et al. Sideband cooling of micromechanical motion to the quantum ground state. Nature 475, 359 (2011).

5.257. Z. Xiang, S. Asshab, J. You and F. Nori. Rev. Mod. Phys. 85, 623 (2013).

5.258. S. Probst, H. Rotzinger, S. Wuensch, P. Jung, M. Jerger, M. Siegel, A. V. Ustinov, and P. A. Bushev. Anisotropic rare-earth spin ensemble strongly coupled to a superconducting resonator. Phys. Rev. Lett. 110, 157001 (2013).

5.259. Y. Kubo, C. Grezes, A. Dewes, et al. Phys. Rev. Lett. 107, 220501 (2011).

5.260. M. H. Devoret and R. J. Schoelkopf. Superconducting Circuits for Quantum Information: An Outlook. Science 339, 1169-1174 (2013).

5.261. L. DiCarlo, J. M. Chow, J. M. Gambetta, Lev S. Bishop, B. R. Johnson, D. I. Schuster, J. Majer, A. Blais, L. Frunzio, S. M. Girvin, and R. J. Schoelkopf. Demonstration of two-qubit algorithms with a superconducting quantum processor. Nature 460, 240 (2009).

5.262. T. Yamamoto, M. Neeley, E. Lucero, R. C. Bialczak, J. Kelly, M. Lenander, M. Mariantoni, A. D. O'Connell, D. Sank, H. Wang, M. Weides, J. Wenner, Y. Yin, A. N. Cleland, and J. M. Martinis. Quantum process tomography of two-qubit controlled-Z and controlled-NOT gates using superconducting phase qubits. Phys. Rev. B 82, 18 (2010).

5.263. T. Lanting et al., Entanglement in a Quantum Annealing Processor. Phys. Rev. X 4, 021041 (2015).

5.264. B. Heim, T. F. Rшnnow, D. V. Isakov, and M. Troyer, Quantum versus Classical Annealing of Ising Spin Glasses. Science 348, 215 (2015).

5.265. S. W. Shin, G. Smith, J. A. Smolin, and U. Vazirani. How «Quantum» is the D-Wave Machine? ArXiv: 1401.7087.

5.266. T. F. Rшnnow, Zh. Wang, J. Job, S. Boixo, S. V. Isakov, D. Wecker, J. M. Martinis, D. A. Lidar, and M. Troyer. Defining and detecting quantum speedup, Science Express 10.1126 (2014).

5.267. V. S. Denchev et al., What is the Computational Value of Finite Range Tunneling?, arXiv:1512.02206

5.268. J. Kelly, et al. State preservation by repetitive error detection in a superconducting quantum circuit. Nature 519, 66–69 (2015).

5.269. A.D. Corcoles, et al. Demonstration of a quantum error detection code using a square lattice of four superconducting qubits. Nature Commun. 6, 6979 (2015).

Глава 6

6.1. Картографическая система Google // Электрон. Дан.— США, 2015.— Заглавие с экрана.— Режим доступа: http: // maps. google.ru/.

6.2. Картографическая система Yandex // Электрон. Дан.— Россия, 2015.— Заглавие с экрана.— Режим доступа: http: // maps. yandex.ru/.

6.3. Основы космических информационных систем / А. А. Романов, А. А. Романов // Учебное пособие.— М.: Радиотехника, 2013.— 352 с: ил. ISBN 978-5-88070-333-3.

6.4. Reliability analysis in aperture synthesis interferometric radiometers: Application to L-band MIRAS instrument / Vall-llossera, M., N. Duffo, A. Camps, I. Corbella, F. Torres, J. Bara // Radio Sci.— 2001.— Vol. 36, N 1.— P. 107 — 117.

6.5. Measuring Ocean Salinity with ESA's SMOS Mission / M. Berger, A. Camps, J. Font, Y. Kerr, J. Miller, J. Johannessen, J. Boutin, M. R. Drinkwater, N. Skou, N. Floury, M. Rast, H. Rebhan, E. Attema, // ESA Bulletin.— 2002.— Vol. 111.— 113f

6.6. Космическая система Sentinel // Электрон. дан.— ЕС, 2015.— Заглавие с экрана. -Режим доступа: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Overview4.

6.7. Космическая система Copernicus // Электрон. дан.— ЕС, 2015.— Заглавие с экрана. -Режим доступа: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Overview3.

6.8. Study of ocean surface features observed with airborne RAR and SAR ALMAZ-1 satellite / A. V. Smirnov, V.V.Yakovlev. // Proc. IGARSS'92.— 1992.— Houston, Texas, USA, May 26-29 1992.— Vol. 1.— P. 471–473.

6.9. Trends in satellite communications and the role of optical free-space communications / M. Toyoshima // Journal of Optical Networking.— 2005.— Vol. 4.— P. 300–311.

6.10. Концептуальные подходы к созданию перспективных космических систем / А. А. Романов, А. А. Романов, Ю. М. Урличич, А. Е. Буравин // Механика, управление и информатика.— 2011.— №5, — С. 92–104.

6.11. Космическая система JPSS // Электрон. дан.— ЕС, 2015.— Заглавие с экрана. -режим доступа: http://www.jpss.noaa.gov/.

6.12. Optical terminals for microsatellite swarms / W. R. Leeb, A. Kalmar, K. H. Kudielka, P. J. Winzer // Proc. SPIE 4635.— 2002.— P. 202–214

6.13. Study for HDR cross-link for formation flight satellite systems / N. Nishinaga, Y. Takayama, T. Takahashi, Y. Ogawa, T. Kubooka, H. Umehara // Proc. SPIE 4975/ — 2003.— P. 45–56.

6.14. Optical Communications for Deep Space Mission / K. Wilson, M. Enoch // IEEE Commun. Magazine.— 2000.— N 38.— P. 134–139.

6.15. Обработка данных гиперспектрального аэрокосмического зондирования / В. В. Козодеров, Т. В. Кондранин, Е. В. Дмитриев, О. Ю. Казанцев, И. В. Персев, М. В. Щербаков // Исследование Земли из космоса.— 2012.— N 5.— С. 3–11.

6.16. AltiKa: a Ka-band Altimetry Payload and System for Operational Altimetry during the GMES Period / P. Vincent, N. Stenou, E. Caubet, L. Phalippou, L. Rey, E. Thouvenot, J. Verron // IEEE Sensors.— 2006.— EXCO, Daegu, Korea, Oct. 22-25, 2006.— P. 208–234.

6.17. The Surface Water and Ocean Topography Mission (SWOT): The Ka-band Radar Interferometer (KaRIn) for water level measurements at all scales / E. Rodriguez, D. Esteban-Fernandez // Proceedings of the SPIE Remote Sensing Conference.— 2010.— Toulouse, France, Sept. 20-23, 2010.— Vol. 7826.— Paper: 7826-36.

6.18. The SWOT (Surface Water and Ocean Topography) Mission: Spaceborne Radar Interferometry for Oceanographic and Hydrological Applications/ L-L. Fu, D. Alsdorf, E. Rodriguez, R. Morrow, N. Mognard, J. Lambin, P. Vaze, T. Lafon // Proceedings of OceanObs'09.— 2009.— Venice, Italy, Sept. 21–25, 2009.

6.19. Optical phased array technology / P. F. Mcmanamon, T. A. Dorschner, D. L. Corkum, L. J. Friedman, D. S. Hobbs, M. Holz, S. Liberman, H.Q. Nguyen, D. P. Resler, R.C. Sharp, E.A. Watson // Proc. IEEE.— 1996.— Vol. 84.— N 2.— P. 268–298.

6.20. Технология работы космической оптической линии связи для повышения оперативности управления и получения информации потребителем в процессе функционирования космических средств / Б. В. Королёв // Космическая техника и технологии.— 2014.— Т. 1.— N 4.— С. 39–47.

6.21. Optical GEO Feeder Link Design / N. Perlot, T. Dreischer, C. Weinert, J. Perdigues // Future Network & Mobile Summit.— 2012.— Berlin.

6.22. BTDI CCD21122 Optical Performance Test Report / S. Hilbert, and D. Krutz // DLR-OS.— 2014.

6.23. Optical Communications — A Decade of Preparations / N. Lindgren // Proceedings of the IEEE.— 1970.— Vol. 58.— N. 10.— P. 1410–1418.

6.24. In-orbit test results of the optical intersatellite link, SILEX. A milestone in satellite communication / T.T. Nielsen, G. Oppenhaeuser, B. Laurent, G. Planche // Proceedings of 53rd International Astronautical Congress.— 2002. IAC-02-M.2.01, Huston, Oct. 2002.— P. 1–11.

6.25. The communication payload of the ARTEMIS European satellite / A. Sbardellati, T. Sassorossi, M. Marinelli, and R. Guibilei // Proceedings of AIAA Conf.— 1994.— AIAA-94-0905-CP.— P. 22–32.

6.26. Joint United States-Germany Satellite Laser Communications Project: NFIRE-to-TerraSAR-X ISLs and NFIRE-to-Ground SGLs / C. Lunde, R. Fields, R. Wong, J. Wicker, D. Kozlowski, J. Skoog, G. Muehlnikel, J. Hartmann, U. Sterr, M. Lutzer // International Workshop on Ground-to-OICETS Laser Communications Experiments.— 2010.— May 13–15, 2010, Tenerife, Spain.— Paper: GOLCE2010-08.

6.27. DIN; VDE; DKE (Hrsg.) // Optische Strahlungssicherheit und Laser 2.— 2010.— DIN-VDE-Taschenbьcher Band 526, 2, Auflage.

6.28. Optical Communications for Deep Space Mission / K. Wilson, M. Enoch // IEEE Commun. Magazine.— 2000.— N 38.— P. 134–139.

6.29. The performance of attitude control system on orbit of Data Relay Test Satellite (DRTS) / Y. Fujiwara, H. Nagano, H. Yonechi, H. Ebisutani // Proceedings of 21st International Communications Satellite Systems.— 2003. -AIAA-2003-2365, April 2003.— P. 1–8.

6.30. Power versus stabilization for laser satellite communication / S. Arnon // Appl. Opt.— 1999.— Vol. 38.— N 15.— P. 3229–3233.

6.31. Analyzing the performance of a nanosatellite cluster-detector array receiver for laser communication / D. Bushuev, D. Kedar, S. Arnon // J. Lightwave Technol.— 2003.— Vol. 21.— N 2.— P. 447–455.

6.32. Adaptive optics and ground-to-space laser communications / R.K. Tyson // Appl. Opt.— 1996.— N 35.— P. 3640–3646.

6.33. Long-term statistics of laser beam propagation in an optical ground-to-geostationary satellite communications link / M. Toyoshima, S. Yamakawa, T. Yamawaki, K. Arai, M. Reyes, A. Alonso, Z. Sodnik, and B. Demelenne // IEEE trans. Antennas and Propagat.— 2005.— Vol. 53.— N 2.— P. 842–850.

6.34. Scintillation reduction using multiple transmitters / I. I. Kim, H. Hakakha, P. Adhikari, E. Korevaar, A. K. Majumdar // Proc. IX Free-Space Laser Communications Technologies.— 1997.— Vol. 2990.

6.35. Optimization of single-mode fiber coupling efficiency with an adaptive membrane mirror / F. Gonté, A. Courteville, R. Dändliker // Opt. Eng.— 2002.— N 41.— P. 1073.

6.36. Aperture averaging of optical scintillations in the turbulent atmosphere / J. H Churnside // Applied Optics.— 1991.— Vol. 30.— P. 1982–1994.

6.37. A Universal Platform for Ubiquitous Wireless Communications Using Radio Over FSO System / P.T. Dat, A. Bekkali, K. Kazaura, K. Wakamori, M. Matsumoto // J. Lightwave Technol.— 2010.— N 28.— P. 2258–2267.

6.38. Transparent optical intersatellite link using double-sideband modulation and homodyne reception / K. Kudielka, K. Pribil // Int. J. Electron. Commun.— 2002.— Vol. 56.— P. 254.

6.39. BER performance analysis of radio over free-space optical systems considering laser phase noise under Gamma-Gamma turbulence channels / W. Lim, C. Yun, K. Kim // Opt. Express.— 2009. N 17. P. 4479–4484.

6.40. European Data Relay Satellite // ESA Bulletin.— 2011.— N 146.— P. 93.

6.41. Космическая деятельность России, США, Китая и Индии / А. Крылов // Технологии и средства связи.— 2011.— N 6. С. 52–54.

6.42. Красовский П.А. Метрология космических навигационных спутниковых систем. Монография. — Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», -2009,-Илл. 44. — Табл. 7.— Библ. 22. — С.216.

6.43. Patrick Gill, Helen Margolis, Anne Curtis, Hugh Klein, Stephen Lea, Stephen Webster, Peter Whibberley // Optical Atomic Clocks for Space, Technical Supporting Document, Version 1.7, November 2008, ESTEC / Contract No. 21641/08/NL/PA, [Электронный ресурс] // URL: http://www.npl.co.uk/upload/pdf/atomic_clocks_space.pdf.

6.44. Global Navigation Satellite Systems — From Stellar to Satellite Navigation, Edited by Ahmed, ISBN 978-953-51-1162-7, 168 pages, Publisher: InTech, Chapters published June 19, 2013 under DOI: 10.5772/56764

6.45. Amar Vutha; Optical frequency standards for gravitational wave detection using satellite Doppler velocimetry/ New J. Phys. 17 (2015), [Электронный ресурс] // URL: http: // iopscience.iop.org/article/10.1088/1367-2630/17/6/063030/pdf

6.46. Ruxandra Bondarescu, Mihai Bondarescu, György Hetényi, Lapo Boschi, Philippe Jetzer, Jayashree Balakrishna; Geophysical applicability of atomic clocks: direct continental geoid mapping // 2013, [Электронный ресурс] // URL: http: // arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1209/1209.2889.pdf

6.47. Enrico Mai, Jürgen Müller; General Remarks on the Potential Use of Atomic Clocks in Relativistic Geodesy // 4/2013 ZFV, p.257-266

6.48. British MoD works on 'quantum compass' technology to replace GPS, RT news, May 15, 2014

6.49. Решение шестой Всероссийской конференции «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2015), Санкт-Петербург, 24 апреля 2015.

6.50. National Research Council, 2013, Optics and Photonics: Essential Technologies for Our Nation

6.51. Wang, B. et al. Precise and Continuous Time and Frequency Synchronisation at the 5X10-19 Accuracy Level. Sci. Rep. 2, 556; OI: 10.1038/srep00556 (2012).

6.52. Knappe, S., L. Liew, V. Shah, P. Schwindt, J. Moreland, L. Hollberg, and J. Kitching. 2004. A microfabricated atomic clock. Applied Physics Letters 85:1460.

6.53. Сивак А. В., Зибров С. А. «Разработка квантового дискриминатора для малогабаритных атомных часов» // Краткие сообщения по физике, Vol. 38, No. 5, pp. 15–23, 2011. (публикация на англ.языке: ISSN 1068-3356, Bulletin of the Lebedev Physics Institute, 2011, vol.38, No.5, pp. 131–136; Allerton Press Inc., 2011)

6.54. National Positioning, Navigation, and Timing Architecture Study, Final Report, National Security Space Office, September 2008.

6.55. Mike Georg Bernhardt, Werner Becker, Tobias Prinz, Ferdinand Maximilian Breithuth and Ulrich Walter; Autonomous Spacecraft Navigation Based on Pulsar Timing Information // Presented at the 2nd International Conference on Space Technology, 15–17 Sept. 2011, Athens, Greece.

6.56. P. S. Ray, K. S. Wood, and B. F. Phlips; Spacecraft Navigation Using X-ray Pulsars // Featured research, 2006, NRL REVIEW, p. 95–102

6.57. В. А. Арефьев, М. Н. Павлинский, С. Н. Федотов, А. А. Лутовинов, Н. П. Семена, В. В. Левин; Рентгеновские пульсары — маяки автономной системы навигации космических аппаратов // Механика, управление и информатика, Сборник трудов всероссийской научно-технической конференции «Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов», Издательство ИКИ РАН, 2009, с. 210–218

6.58. A. M. Rad, L. V. Azar Determining Attitude and Position in Deep Space Missions Using X Ray Pulsars // International Journal of Astronomy and Astrophysics, 2014, 4, 628–648, [Электронный ресурс] // URL: http://www.scirp.org/journal/ijaa, http://dx.doi.org/10.4236/ijaa.2014.44058

6.59. Overview of Results from GNSS Research under the FP7 R&D Programme (2007-2013): From Research Applications to Market, European GNSS Agency (GSA), 2015, [Электронный ресурс] // URL: http://www.gsa.europa.eu/rd-for-galileo-egnos-app

6.60. Гуров М.Г., Гурова Е.Г., Оптические часы на ионах и нейтральных атомах [Электронный ресурс] / М. Г. Гуров, Е. Г. Гурова // Контенант: электрон. науч.-техн. журн. — 2014. — Т. 1, №4. / [Электронный ресурс] // URL: http://www.contenant.ru/1electron_mag/magazine/.

6.61. Benjamin J. Bloom, Building a Better Atomic Clock // A thesis submitted to the University of Colorado in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy Department of Physics, 2014, [Электронный ресурс] // URL: https://jila.colorado.edu/sites/default/files/assets/files/publications/BenBloom_Thesis447.pdf

6.62. N. Poli, M. Schioppo, S. Vogt, St. Falke, U. Sterr, Ch. Lisdat, G. M. Tino; A transportable strontium optical lattice clock // Appl. Phys. B DOI 10.1007/s00340-014-5932-9, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014.

6.63. J. Kitching, S. Knappe, L. Liew, J. Moreland, H. G. Robinson, P. Schwindt, V. Shah, V. Gerginov and L. Hollberg; Chip-Scale Atomic Clocks at NIST // 2005 NCSL International Workshop and Symposium, [Электронный ресурс] // URL: http://tf.boulder.nist.gov/general/pdf/2067.pdf

6.64. Пивцов В. С., Нюшков Б. Н.; Разработка мобильных прецизионных фемтосекундных оптических часов для метрологии и спутниковых навигационных систем // Отчетная сессия по программе Президиума РАН 16 декабря 2013, ФИАН им. П. Н. Лебедева

6.65. План мероприятий («дорожная карта») «Развитие оптоэлектронных технологий (фотоники)». Утвержден распоряжением Правительства Российской Федерации от 24 июля 2013 г. №1305-р.

6.66. Leading Edge Technology Enables a Chip Scale Atomic Clock // Simmetricon White Paper, 2012, [Электронный ресурс] // URL: http://www.ecnmag.com/sites/ecnmag.com/files/legacyimages/WP_LeadingEdgeTechnology_CSAC.pdf

6.67. National strategy for quantum technologies: A new era for the UK, Published by Innovate UK and the Engineering and Physical Sciences Research Council on behalf of the Quantum Technologies Strategic Advisory Board, March 2015 T15/080, [Электронный ресурс] // URL: https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/414788/Strategy_QuantumTechnology_T15-080_final.pdf,

6.68. S. T. Мьller, J de Martin Jъnior, R. D. Pechoneri, P. Santa Catharina1, V. S. Bagnato and D. V. Magalhres; New generation of a mobile primary frequency standard based on cold atoms // Journal of Physics: Conference Series 575.

6.69. Формы государственной поддержки промышленности. Государственная программа «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности» [Электронный ресурс] // URL: http://minpromtorg.gov.ru/common/upload/files/docs/GP_razvitie_promyshlenosti_povysh_konkurentosposobnosti[1].pdf

Глава 7

7.1. Hell, S. W. Breaking the diffraction resolution limit by stimulated emission: Stimulated-emission-depletion fluorescence microscopy/ S. W. Hell, J. Wichmann // Opt. Lett. — 1994 — vol. 19, № 11 — pp. 780–782.

7.2. Huang, B. Three-dimensional super-resolution imaging by stochastic optical reconstruction microscopy/ B. Huang, W. Wang, M. Bates, X. Zhuang // Science. — 2008 — vol. 319, № 5864 — pp. 810–813.

7.3. Hell, S. W. Far-Field Optical Nanoscopy / S. W. Hell // Science — 2007 — №316 — pp. 1153–1158.

7.4. Hell, S. W. Concepts for nanoscale resolution in fluorescence microscopy/ S. W. Hell, M. Dyba, S. Jakobs // Curr. Opin. Neurobiol.— 2004 — №14, — pp. 599–609.

7.5. Denk, W. Two-photon laser scanning fluorescence microscopy/ W. Denk, J. H. Strickler, W. W. Webb // Science.— 1990 — vol. 248, №4951 — pp. 73–76.

7.6. Rajadhyaksha, M. In vivo confocal scanning laser microscopy of human skin: Melanin provides strong contrast/ M. Rajadhyaksha, M. Grossman, D. Esterowitz, R. H. Webb, R. R. Anderson // J. Investigative Dermatol.— 1995 — vol. 104, №6, — pp. 946–952.

7.7. So, P. Two-photon deep tissue ex vivo imaging of mouse dermal and subcutaneous structures / P. So, H. Kim, I. Kochevar // Opt. Exp.— 1998 — vol. 3, №9, — pp. 339–350.

7.8. Berland, K. M. Two-photon fluorescence correlation spectroscopy: Method and application to the intracellular environment/ K. M. Berland, P. T. So, E. Gratton // Biophys. J., — 1995 — vol. 68, №2 — pp. 694–701.

7.9. Celso, C. Lo. Live-animal tracking of individual haematopoietic stem/ progenitor cells in their niche/ C. Lo Celso, H. E. Fleming, J. W. Wu, C. X. Zhao, S. Miake-Lye, J. Fujisaki, D. Cote, D. W. Rowe, C. P. Lin, D. T. Scadden // Nature.— 2009 — vol. 457, №7225 — pp. 92–96.

7.10. Boucher, Y. Tumor angiogenesis and interstitial hypertension / Y. Boucher, M. Leunig, and R. K. Jain // Cancer Res.— 1996 — vol. 56, №18 — pp. 4264–4266.

7.11. Brown, E. B. B In vivo measurement of gene expression, angiogenesis and physiological function in tumors using multiphoton laser scanning microscopy/ E. B. Brown, R. B. Campbell, Y. Tsuzuki, L. Xu, P. Carmeliet, D. Fukumura, R. K. Jain // Nature Med.— 2001 — vol. 7, №7 — pp. 864–868.

7.12. Cheng, J. X. Laser-scanning coherent anti-stokes Raman scattering microscopy and applications to cell biology / J. X. Cheng, Y. K. Jia, G. Zheng, X. S. Xie // Biophys. J. -2002 — vol. 83, №1 — pp. 502–509.

7.13. Puppels, G. J. Studying single living cells and chromosomes by confocal Raman microspectroscopy/ G. J. Puppels, F. F. de Mul, C. Otto, J. Greve, M. Robert-Nicoud, D. J. Arndt-Jovin, T. M. Jovin // Nature.— vol. 347, №6290 — pp. 301–303.

7.14. Gardner, C. M. Detection of lipid core coronary plaques in autopsy specimens with a novel catheter-based near-infrared spectroscopy system/ C. M. Gardner, H. Tan, E. L. Hull, J. B. Lisauskas, S. T. Sum, T. M. Meese, C. Jiang, S. P. Madden, J. D. Caplan, A. P. Burke, R. Virmani, J. Goldstein, J. E. Muller // J. Amer. Coll. Cardiol. Cardiovascular Imaging.— 2008 — vol. 1, №5 — pp. 638–648.

7.15. Georgakoudi, I. Fluorescence, reflectance, and light-scattering spectroscopy for evaluating dysplasia in patients with Barrett's esophagus/ I. Georgakoudi, B. C. Jacobson, J. Van Dam, V. Backman, M. B. Wallace, M. G. Muller, Q. Zhang, K. Badizadegan, D. Sun, G. A. Thomas, L. T. Perelman, M. S. Feld // Gastroenterology.— 2001 — vol. 120, №7 — pp. 1620–1629.

7.16. Wang, T. D. Fluorescence endoscopic imaging of human colonic adenomas/ T. D. Wang, J. Van Dam, J. M. Crawford, E. A. Preisinger, Y. Wang, M. S. Feld // Gastroenterology.— 1996 — vol. 111, №5 — pp. 1182–1191.

7.17. Geavlete, B. Hexvix blue light fluorescence cystoscopy VA promising approach in diagnosis of superficial bladder tumors/ B. Geavlete, R. Multescu, D. Georgescu, P. Geavlete // J. Med. Life.— 2008 — vol. 1, №3 — pp. 355–362.

7.18. Gallavardin, T. Photodynamic therapy and two-photon bioimaging applications of hydrophobic chromophores through amphiphilic polymer delivery / T. Gallavardin, M. Maurin, S. Marotte, T. Simon, A. M. Gabudean, Y. Bretonniere, M. Lindgren, F. Lerouge, P. L. Baldeck, O. Stephan, Y. Leverrier, J.Marvel, S. Parola, O. Maury, C. Andraud // Photochem. Photobiol. Sci., Official J. Eur. Photochem. Assoc. / Eur. Soc. Photobiol.— 2011 — vol. 10, №7 — pp. 1216–1225.

7.19. Molpus, K. L. Intraperitoneal photodynamic therapy of human epithelial ovarian carcinomatosis in a xenograft murine model/ K. L. Molpus, D. Kato, M. R. Hamblin, L. Lilge, M. Bamberg, T. Hasan // Cancer Res.— 1996 — vol. 56, №5 — pp. 1075–1082.

7.20. Bachor, R. Free and conjugated chlorin E6 in the photodynamic therapy of human bladder carcinoma cells / R. Bachor, C. R. Shea, S. J. Belmonte, T. Hasan // J. Urology. — 1991 — vol. 146, №6 — pp. 1654–1658.

7.21. Anderson, R. L. Lasermania in medicine / R. L. Anderson, D. V. Pratt, B. C. Patel // Arch. Ophthalmol.— 1998 — vol. 116, №12 — pp. 1657–1658.

7.22. Anderson, R. R. Selective photothermolysis: Precise microsurgery by selective absorption of pulsed radiation / R. R. Anderson, J. A. Parrish // Science.— 1983 — vol. 220, №4596 — pp. 524–527.

7.23. Chung, H. The nuts and bolts of low-level laser (light) therapy / H. Chung, T. Dai, S. K. Sharma, Y. Y. Huang, J. D. Carroll, M. R. Hamblin // Ann. Biomed. Eng.— Feb. 2012 — vol. 40, №2 — pp. 216–233.

7.24. Bjordal, J. M. A systematic review with meta-analysis of the effect of low-level laser therapy (LLLT) in cancer therapy-induced oral mucositis / J. M. Bjordal, R. J. Bensadoun, J. Tuner, L. Frigo, K. Gjerde, R. A. Lopes-Martins // Supportive Care in Cancer: Official J. Multinat. Assoc. Supportive Care Cancer — 2011 — vol. 19, №8 — pp. 1069–1077.

7.25. Stockman, M. The spaser as a nanoscale quantum generator and ultrafast amplifier/ M. Stockman // J. Optics — 2010 — №12 — pp. 024004–024021.

7.26. Halas, N. J. Plasmons in Strongly Coupled Metallic Nanostructures / N. J. Halas, S. Lal, W. Chang, S. Link, P. Nordlander // Chem. Rev.— 2011 — №111 — pp. 3913–3961.

7.27. Surface-Enhanced Raman Scattering, Physics and Applications/K.Kneipp, M.Moskovits, H. Kneipp (Eds.), Topics in Applied Physics 103, Springer 2006

7.28. Stockman, M. I. Nanoplasmonic sensing and detection / M. I. Stockman // Science -2015-vol. 348 — pp. 287–288.

7.29. Singh, P. SPR Biosensors: Historical Perspectives and Current Challenges / P. Singh // Sensors and Actuators B -2016 — vol. 229 — pp.110–130.

7.30. Kreyling, W.G. In vivo integrity of polymer-coated gold nanoparticles / W.G. Kreyling, A.M. Abdelmonem, Z. Ali, F. Alves, M. Geiser, N.Haberl, R. Hartmann, S. Hirn, D.J.de Aberasturi, K. Kantner, G. Khadem-Saba, J.-M. Montenegro, J.Rejman, T. Rojo, I. R. de Larramendi, R.Ufartes, A. Wenk, W.J. Parak // Nature Nanotechnology.— 2015 — №10 — pp. 619–623.

7.31. Natan, M. J. Concluding Remarks Surface Enhanced Raman Scattering/ M. J. Natan // Faraday Discuss.— 2006 — №132 — pp. 321–328.

7.32. Pierre, M. C. S. Correlating Molecular Surface Coverage and Solution-Phase Nanoparticle Concentration to Surface-Enhanced Raman Scattering Intensities / M. C. S. Pierre, P. M. Mackie, M. Roca, A. J. Haes // J. Phys. Chem. C — 2011 — №115 — pp. 18511–18517.

7.33. Jun, B.-H. Multifunctional Silver-Embedded Magnetic Nanoparticles as SERS Nanoprobes and Their Applications / B.-H. Jun, M. S. Noh, J. Kim, G. Kim, H. Kang, M.-S. Kim, Y.-T. Seo, J. Baek, J.-H. Kim, J. Park, S. Kim, Y.-K. Kim, T. Hyeon, M.-H. Cho, D. H. Jeong, Y.-S. Lee // Small.— 2010 — №6 — pp. 119–125.

7.34. Cao, Y. C. Nanoparticles with Raman Spectroscopic Fingerprints for DNA and RNA Detection / Y. C. Cao, R. Jin, C. A. Mirkin // Science.— 2002 — №297 — pp. 1536–1540.

7.35. Barhoumi, A. Label-Free Detection of DNA Hybridization Using Surface Enhanced Raman Spectroscopy/ A. Barhoumi, N. J. Halas // J. Am.Chem. Soc.— 2010 — №132 — pp. 12792–12793.

7.36. Ansar, S. M. Quantitative Comparison of Raman Activities, SERS Activities, and SERS Enhancement Factors of Organothiols: Implication to Chemical Enhancement / S. M. Ansar, X. Li, S. Zou, D. Zhang // J. Phys. Chem. Lett.— 2012 — №3 — pp. 560–565.

7.37. Mendoza, A. Grating coupled SPR microarray analysis of proteins and cells in blood from mice with breast cancer/ A. Mendoza, D. M. Torrisi, S. Sell, N. C. Cady, and D. A. Lawrence // Analyst — 2016 — vol.141, №2 — pp. 704–712.

7.38. Thackray, B.D. Super-Narrow, Extremely High Quality Collective Plasmon Resonances at Telecom Wavelengths and Their Application in a Hybrid Graphene-Plasmonic Modulator/ B. D. Thackray, P. A. Thomas, G. H. Auton, F. J. Rodriguez, O. P. Marshall, V. G. Kravets, and A. N. Grigorenko // Nano Lett. — 2015 -vol. 15 — p. 3519.

7.39. Biophotonics Market: Global Scenario, Trends, Industry Analysis, Size, Share and Forecast 2014 — 2020» Transparency Market Research.

7.40. Мыглан, В. В. К вопросу о состоянии эндоскопии в Российской Федерации, и предложения в сфере импортозамещающих технологий [Электронный ресурс] / В. В. Мыглан // Экспертный союз.— 2015 — №3, Спецвыпуск. — Режим доступа: http://www.unionexpert.ru/index.php/zhurnal-qekspertnyj-soyuzq-osnova/zhurnal-qehkspertnihyj-soyuzq-3-2015g-spec/item/1093-k-voprosu-o-sostoianii-endoskopii-i-rf.

7.41. Huyett, L. M. Design and Evaluation of a Robust PID Controller for a Fully Implantable Artificial Pancreas/ L. M. Huyett, E.Dassau, H. C. Zisser, F. J. Doyle // Ind. Eng. Chem. Res.— 2015 — Vol. 54, №42 — pp. 10311–10321.

7.42. Terentyuk, G. Gold nanorods with hematoporphyrin-loaded silica shell for dual-modality photodynamic and photothermal treatment of tumors in vivo / G. Terentyuk, E. Panfilova, V. Khanadeev, D. Chumakov, E. Genina, A. Bashkatov, V. Tuchin, A. Bucharskaya, G. Maslyakova, N. Khlebtsov, B. Khlebtsov // Nano Research — 2014 — №7 — pp. 325–337.

7.43. Kabanov, A. V. A new class of drug carriers: micelles of poly (oxyethylene)-poly (oxypropylene) block copolymers as microcontainers for drug targeting from blood in brain / A. V. Kabanov, E. V. Batrakova, N. S.Melik-Nubarov, N. A. Fedoseev, T. Y. Dorodnich, V. Y Alakhov, V. P. Chekhonin, I. R. Nazarova, V. A. Kabanov // Journal of Controlled Release — 1992 — Vol. 2, №22 — pp. 141–157.

7.44. Chen, Y. Low-dosechemotherapy of hepatocellular carcinoma through triggered-release frombilayer-decorated magnetoliposomes / Y. Chen, Y. Chen, D. Xiao, A. Bose, R. Deng, G.D. Bothun // Colloids Surf. B: Biointerfaces — 2014 — №116 — pp. 452–458.

7.45. German, S. V. Liposomes loaded with hydrophilic magnetite nanoparticles: Preparationand application as contrast agents for magneticresonance imaging / S. V. German, N. A. Navolokin, N. R. Kuznetsova, V. V. Zuev, O. A. Inozemtsevaa, A. A. Anis'kov, E. K. Volkova, A. B. Bucharskaya, G. N. Maslyakova, R. F. Fakhrullin, G. S. Terentyuk, E. L. Vodovozova, D. A. Gorin // Colloids and Surfaces B: Biointerfaces — 2015 — №135 — pp. 109–115.

7.46. Sukhorukov, G. B. Stepwise polyelectrolyte assembly on particle surfaces: a novel approach to colloid design/ G.B. Sukhorukov, E. Donath, S. Davis, H. Lichtenfeld, F. Caruso, V. I. Popov, H. Moehwald // Polym. Adv. Technol.— 1998.— Vol. 9, №10-11.— pp. 759–767.

7.47. Koker, S. D. Polymeric multilayer capsules for drug delivery / S. D. Koker, R. Hoogenboom, B. G. De Geest // Chem. Soc. Rev.— 2012 — №41 — pp. 2867–2884.

7.48. Stetciura, I. Y. Nanoencapsulated and microencapsulated SERS platforms for biomedical analysis / I. Y. Stetciura, A. V. Markin, D. N. Bratashov, G. B. Sukhorukov, D. A. Gorin // Current Opinion in Pharmacology — 2014 — №18 — pp.149–158.

7.49. Terentyuk, G. S. Circulation and distribution of gold nanoparticles and induced alterations of tissue morphology at intravenous particle delivery / G. S. Terentyuk,, G. N. Maslyakova, L. V. Suleymanova, B. N. Khlebtsov, B. Y. Kogan, G.G. Akchurin, A. V. Shantrocha, I. L. Maksimova, N. G. Khlebtsov, V. V. Tuchin // Journal of Biophotonics — 2009 — Vol. 2, №5 — pp. 292–302.

7.50. Catauro, M., Bollino, F., Papale, F. Synthesis of SiO2 system via sol-gel process: Biocompatibility tests with a fibroblast strain and release kinetics / M. Catauro, F. Bollino, F. Papale, // Journal of Biomedical Materials Research Part A -2014 — Vol. 102, №6 — pp. 1677–1680.

7.51. Landfester, K. (2013). Nanocapsules with specific targeting and release properties using miniemulsion polymerization / K. Landfester, V. Mailдnder // Expert opinion on drug delivery — 2013 — Vol. 10, №5 — pp. 593–609.

7.52. Tong, W. Layer-by-layer assembly of microcapsules and their biomedical applications/ W. Tong, X. Song, C. Gao // Chemical Society Reviews -2012 — Vol. 41, №18 — pp. 6103–6124.

7.53. Bhanvase, B. A. Ultrasound assisted in situ emulsion polymerization for polymer nanocomposite: A review / B. A. Bhanvase, S. H. Sonawane // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification -2014 — №85 — pp. 86–107.

7.54. Sridhar, R. Electrosprayed nanoparticles for drug delivery and pharmaceutical applications/ Sridhar, R., & Ramakrishna, S. // Biomatter — 2013 — Vol. 3, №3 — pp. e24281.

7.55. Inosemtseva, O. A. Electrospinning of functional materials for biomedicine and tissue engineering / O. A. Inosemtseva, A. N. Severuchina, I. V. Vidyasheva, N. V. Petrova, H. A. Metwally, I. Y. Stetciura, D. A. Gorin // Rus. Chem. Rev.— 2015 — Vol. 84, №3 — pp. 251–274.

7.56. Torchilin, V. Tumor delivery of macromolecular drugs based on the EPR effect / V. Torchilin // Advanced drug delivery reviews — 2011 — Vol. 63, №3 — pp. 131–135.

7.57. Kolesnikova, T. A. Red blood cells and polyelectrolyte multilayer capsules: natural carriers versus polymer-based drug delivery vehicles / T. A. Kolesnikova, A. G. Skirtach, H. Möhwald // Expert opinion on drug delivery — 2013 — Vol. 10, №1 — pp. 47–58.

7.58. Garay, R. P. Antibodies against polyethylene glycol in healthy subjects and in patients treated with PEG-conjugated agents/ R. P. Garay, R. El-Gewely, J. K. Armstrong, G. Garratty, P. Richette, // Expert opinion on drug delivery — 2011 — Vol. 9, №11 — pp. 1319-1323.

7.59. U.S. Patent Application No. 14/481,389. Cyclic peg coatings increase the blood circulation time of particles used in drug delivery applications / C. Pugh, G. R. Montenegro-Galindo. — №US20150071860 A1, заявл. 09.09.14, опубл. 12.03.15; приоритет 09.09.13 — 24.

7.60. Chesné, J. The Use of Adjuvas for Enhancing Allergen Immunotherapy Efficacy / J. Chesné, C. B. Schmidt-Weber, J. E. von-Bieren, // Immunology and allergy clinics of North America — 2016 — Vol. 36, №1 — pp. 125–145.

7.61. Garratty, G. Modulating the red cell membrane to produce universal/stealth donor red cells suitable for transfusion/ G. Garratty // Vox Sanguinis — 2008 — Vol. 94, №2 — pp. 87–95.

7.62. Kreyling, W. G. In vivo integrity of polymer-coated gold nanoparticles / W. G. Kreyling, A. M. Abdelmonem, Z. Ali, F. Alves, M. Geiser, N. Haberl, R. Hartmann, S. Hirn, D. J. de Aberasturi, K. Kantner, G. Khadem-Saba, J.-M. Montenegro, J. Rejman, T. Rojo, I. R. de Larramendi, R. Ufartes, A. Wenk, W. J. Parak, // Nature Nanotechnology — 2015 — №10 — pp. 619–623.

7.63. Kolesnikova, T. A. Visualization of magnetic microcapsules in liquid by optical coherent tomography and control of their arrangement via external magnetic field / T. A. Kolesnikova, Ga. G. Akchurin, S. A. Portnov, G. B. Khomutov, Ge. G. Akchurin, O. G. Naumova, G. B. Sukhorukov, D. A. Gorin // Laser Physics Letters — 2012 — Vol. 9, №9 — pp. 643–648.

7.64. Stetciura, I. Y. Composite SERS-based satellites navigated by optical tweezers for single cell analysis / I. Y. Stetciura, A. Yashchenok, A. Masic, E. V. Lyubin, O. A. Inozemtseva, M. G. Drozdova, E. A. Markvichova, B.N. Khlebtsov, A. A. Fedyanin, G. B. Sukhorukov, D. A. Gorin, D. Volodkin // Analyst — 2015 — №140 — pp. 4981–4986.

7.65. Ramaswamy, K. Targeted microbubbles: a novel application for the treatment of kidney stones/ K. Ramaswamy, V. Marx, D. Laser, T. Kenny, T. Chi, M. Bailey, M. L. Stoller // . BJU international — 2015 — №116 — pp. 9–16.

7.66. Graham, S.M. Inertial cavitation to non-invasively trigger and monitor intratumoral release of drug from intravenously delivered liposomes / S. M. Graham, R. Carlisle, J. J. Choi, M. Stevenson, A. R. Shah, R. S. Myers, K. Fisher, M. B. Peregrino, L. Seymour, C. C. Coussios // Journal of Controlled Release — 2014 — №178 — pp. 101–107.

7.67. Rizzitelli, S. Sonosensitive theranostic liposomes for preclinical in vivo MRI-guided visualization of doxorubicin release stimulated by pulsed low intensity non-focused ultrasound / S. Rizzitelli, P. Giustetto, J. C. Cutrin, D.D. Castelli, C. Boffa, M. Ruzza, V. Menchise, F. Molinari, S. Aime, E. Terreno // Journal of Controlled Release — 2015 — №202 — pp. 21–30.

7.68. Szabo, T. L. Diagnostic Ultrasound Imaging: Inside Out / T. L. Szabo; — Elsevier press, 2014.— 549 p.— ISBN 0-12-680145-2.

7.69. Kruger, R. A. Photoacoustic ultrasound / R. A. Kruger // Med. Phys.— 1994 — vol. 21, №1 — pp. 127–131.

7.70. Oraevsky, A. A. Measurement of tissue optical properties by time-resolved detection of laser-induced transient stress / A. A. Oraevsky, S. L. Jacques, F. K. Tittel // Appl. Opt.— 1997 — vol. 36, №1 — pp. 402–415.

7.71. Wang, Q. X-ray Visible and Uniform Alginate Microspheres Loaded with in Situ Synthesized BaSO4 Nanoparticles for in Vivo Transcatheter Arterial Embolization / Q. Wang, K. Qian, S. Liu, Y. Yang, B. Liang, C. Zheng, X. Yang, H. Xu, A. Q. Shen // Biomacromolecules — 2015 — Vol. 16, №4 — pp. 1240–1246.

7.72. Erickson, S. J. Three-dimensional fluorescence tomography of human breast tissues in vivo using a hand-held optical imager / S. J. Erickson, S. L. Martinez, J. DeCerce, A. Romero, L. Caldera, A. Godavarty // Physics in medicine and biology — 2013 — Vol. 58, №5 — pp. 1563–1579.

7.73. Bergman, D. J. Surface Plasmon Amplification by Stimulated Emission of Radiation: Quantum Generation of Coherent Surface Plasmons in Nanosystems/ D. J. Bergman, M. I. Stockman // Phys. Rev. Lett.— 2003 — Vol. 90, №2 — pp. 027402-1 — 0274402-4.

7.74. Galanzha, E. I. Spaser as Novel Versatile Biomedical Tool [Электронный ресурс] / E. I. Galanzha, R. Weingold, D. A. Nedosekin, M. Sarimollaoglu, A. S. Kuchyanov, R. G. Parkhomenko, A. I. Plekhanov, M. I. Stockman, V. P. Zharov // — 2015. arXiv: 1501.00342

7.75. Pelaz, B., et al. Surface functionalization of nanoparticles with polyethylene glycol: effects on protein adsorption and cellular uptake // ACS — 2015 — Vol. 9, №7 — pp. 6996–7008.

7.76. Global Biosensors Market to Reach US$12 Billion by 2015, According to a New Report by Global Industry Analysts, Inc. [Электронный ресурс]: Электронные данные.— Режим доступа: http://www.prweb.com/releases/biosensors/medical_biosensors/prweb8067456.htm

7.77. BCC-market research report «Global Markets for Laser Systems, Components and Materials». 2012 г

7.78. 3D Bioprinting Market Analysis By Technology (Magnetic Levitation, Inkjet Based, Syringe Based, Laser Based), By Application (Medical, Dental, Biosensors, Consumer/Personal Product Testing, Bioinks, Food And Animal Product Bioprinting) And Segment Forecasts To 2022. [Электронный ресурс]: URL: http://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/3d-bioprinting-market

Глава 8

8.1. National Research Council (NRC), Committee on Harnessing Light: Capitalizing on Optical Science Trends and Challenges for Future Research; National Materials and Manufacturing Board; Division on Engineering and Physical Sciences (2013) Optics and Photonics: Essential Technologies for our Nation. // Электронный ресурс. URL: http://www.nap.edu/catalog/13491/optics-and-photonics-essential-technologies-for-our-nation

8.2. Пономарев А.К., Романов А.А., Тюлин А.Е. (2016) Фотонные технологии в космическом приборостроении // Ракетно- космическое приборостроение и информационные системы, Том 3. Выпуск 2. с. 4–23.

Заключение

9.1. Дежина И. Г., Пономарев А. К., Фролов А. С. и др. (2015) Новые производственные технологии: Публичный аналитический доклад / М.: Издательский дом «Дело», 272 стр. URL: http://www.skoltech.ru/app/data/uploads/2014/02/Doklad-PPT_for-publishing-4.pdf .

9.2. Пономарев А. К., Романов А. А., Тюлин А. Е. (2016) Фотонные технологии в космическом приборостроении // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, Том 3. Выпуск 2. с. 4–23.

9.3. Ключевые гипотезы Национальной технологической инициативы: версия 1 // Электронный ресурс. URL: http://nti.wikivote.ru/attachments/1/76c681ba-fbc4-4c9d-9f49-bbb48a8b738e/Стратения_НТИ__версия_1_.pdf

9.4. Ключевые гипотезы Национальной технологической инициативы: версия 2 // Электронный ресурс. URL: http://nti.wikivote.ru/attachments/1/76c681ba-fbc4-4c9d-9f49-bbb48a8b738e/Стратения_НТИ__версия_2_.pdf

УДК [621.383 + 535.14](042.3)
ББК 32.854 + 22.34
Р 17

Развитие фотоники в России
Р 17 **и мире** : публичн. аналит. доклад.— М.: Битуби, 2016.—
432 с. : ил.

Руководитель авторского коллектива:
И. Г. Дежина, руководитель группы по научной и промышленной политике, д-р экон. наук, Сколтех

Научные редакторы:
И. Р. Габитов, руководитель Центра фотоники и квантовых материалов, канд. физ.-мат. наук, Сколтех (разделы 4, 5, 6, 7, 8); *В. П. Драчев,* профессор, канд. физ.-мат. наук, Сколтех, доцент, Университет Северного Техаса (разделы 4, 5, 6, 7); *П. С. Дорожкин,* главный науч. сотр. канд. физ.-мат. наук, Сколтех (раздел 4); *А. А. Романов,* главный конструктор направления, зам. директора проектов, д-р техн. наук, АО «Российские космические системы» (раздел 6); *И. Г. Дежина,* руководитель группы по научной и промышленной политике, д-р экон. наук, Сколтех (разделы 1, 2, 3, Приложение).

Список авторов:
И. Г. Дежина, руководитель группы по научной и промышленной политике, д-р экон. наук, Сколтех (разделы 1, 2, 3, Приложение); *А. К. Пономарев,* вице-президент по стратегии и связям с индустрией, канд. техн. наук, Сколтех (введение, раздел 8, заключение); *А. С. Фролов,* аналитик по промышленной политике, Сколтех (разделы 1, 2, 3); *И. Р. Габитов,* руководитель Центра фотоники и квантовых материалов, канд. физ.-мат. наук, Сколтех (раздел 8, заключение); *А. Г. Насибулин,* профессор, д-р техн. наук, Сколтех (раздел 4.5); *В. П. Драчев,* профессор, канд. физ.-мат. наук, Сколтех, доцент, Университет Северного Техаса (разделы 4.2, 7); *В. В. Перебейнос,* профессор, канд. физ.-мат. наук, Сколтех (раздел 4.4); *А. Л. Вятских,* аспирант, Сколтех (раздел 4.5); *Д. А. Горин,* профессор, д-р хим. наук, Саратовский государственный университет (раздел 7); *С. В. Иванов,* профессор, д-р физ.-мат. наук, ФТИ им. А. Ф. Иоффе (раздел 4.1); *С. М. Кобцев,* директор, д-р физ.-мат. наук, ЗАО «Техноскан» (раздел 4.6); *С. А. Козлов,* профессор, д-р физ.-мат. наук, НИУ ИТМО (раздел 5.2); *Н. А. Малеев,* ст. научн. сотр. канд., физ.-мат. наук, ФТИ им. А. Ф. Иоффе (раздел 4.1); *О. Е. Наний,* профессор, начальник научно-исследовательского отдела, д-р физ.-мат. наук, МГУ им. М. В. Ломоносова, ООО «Т8» (раздел 5.1); *Н. В. Никоноров,* профессор, д-р физ.-мат. наук, НИУ ИТМО (раздел 4.3); *А. А. Романов,* главный конструктор направления, зам. директора проектов, д-р техн. наук, АО «Российские космические системы» (раздел 6); *А. А. Романов,* зам. ген. директора по науке, д-р техн. наук, АО «Российские космические системы» (раздел 6); *В. Л. Семененко,* научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук, Сколтех (раздел 4.4); *А. В. Устинов,* профессор, д-р физ.-мат. наук, Технологический институт Карлсруэ / НИТУ «МИСиС» (раздел 5.4); *С. С. Харинцев,* доцент, канд. физ.-мат. наук, Казанский федеральный университет (раздел 5.3); *А. В. Шипулин,* профессор, д-р физ.-мат. наук, Технический университет Дармштадта (раздел 5.1);

Технический редактор: *В. Е. Пригарин.*

Развитие фотоники в России и мире

Публичный аналитический доклад

Научное издание

Технический редактор:
В. Е. Пригарин

Компьютерная вёрстка:
старший дизайнер-верстальщик Роман Фомин,
дизайнер-верстальщик Валерий Арнаутов

Издатель:
ООО «Битуби»

Адрес издателя:
Россия, 125581, г. Москва, ул. Лавочкина, д. 34.
Тел. +7 (495) 162-05-47.
e-mail: info@limeprint.ru

Сдано в набор 10.06.2016 г. Подписано в печать 19.12.2016 г.
Формат 60x84/16. Объём 27,0 п. л. Гарнитура PT Serif PRO Web.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Отпечатано в типографии ООО «ЕМК Групп».

Адрес типографии:
Россия, 123290, г. Москва, ул. Магистральная 2-я, д. 14г, стр. 1, офис 302.
Тел. +7 (495) 741-99-66.
www.emkprint.com.
e-mail: info@emkprint.com.

Заказ № 43. Тираж 600 экз.