

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

В.Ф. Лосев, В.П. Ципилев

ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ

*Рекомендовано УМО по образованию в области приборостроения
и оптотехники в качестве учебного пособия для студентов
высших учебных заведений, обучающихся по направлению
подготовки 200200 «Оптехника»*

Издательство
Томского политехнического университета
2008

УДК 621.373.826 (075.8)
ББК 32.86-5я73
Л79

Лосев В.Ф.

Л79 Лазерные технологии и оборудование: учебное пособие /
В.Ф. Лосев, В.П. Ципилев. – Томск: Изд-во Томского политехни-
ческого университета, 2008. – 148 с.

ISBN 5-98298-241-5

Пособие содержит описание устройств, работы и параметров техноло-
гических лазеров, оборудования лазерных технологических установок и ла-
зерных технологических комплексов. Рассмотрено их применение в различ-
ных областях народного хозяйства. Даются физико-технические основы ла-
зеров и лазерных технологий, различные режимы и особенности технологи-
ческих операций. Большое внимание уделено оптике лазерных пучков и ме-
тодам управления ими.

Разработано в рамках реализации Инновационной образовательной про-
граммы ТПУ по направлению «Энергосберегающие, базовые специальные и
промышленные электроразрядные, радиационные и плазменнопучковые
технологии» и предназначено для студентов, обучающихся по направлению
200200 «Оптотехника».

УДК 621.373.826 (075.8)
ББК 32.86-5я73

Рекомендовано к печати Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета

Рецензент

Доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник ИСЭ СО РАН

В.М. Орловский

ISBN 5-98298-241-5

© Лосев В.Ф., Ципилев В.П., 2008
© Томский политехнический университет, 2008
© Оформление. Издательство Томского
политехнического университета, 2008

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ В КУРС.....	5
Раздел 1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЛАЗЕРЫ. УСТРОЙСТВО, РАБОТА И ПАРАМЕТРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ.....	11
1.1. Экимерные лазеры.....	11
1.1.1. Введение.....	11
1.1.2. Механизм генерации лазера на молекуле KrF.....	12
1.1.3. Схемы предыонизации разрядного промежутка.....	14
1.1.4. Электрические схемы возбуждения.....	16
1.1.5. Прокачка лазерной смеси в разрядном промежутке.....	18
1.1.6. Элементная база эксимерных лазеров.....	20
1.1.7. Эксимерные лазеры, разработанные в ИСЭ СОРАН, г. Томск.....	21
1.1.7.1. Частотные электроразрядные лазеры.....	21
1.1.7.2. Лазеры с накачкой электронным пучком.....	23
1.2. CO ₂ -лазеры.....	25
1.2.1. Введение.....	25
1.2.2. Механизмы создания инверсии в CO ₂ -лазерах.....	26
1.2.3. Конструкции и способы возбуждения CO ₂ -лазеров.....	28
1.2.4. Схемы питания газового лазера с продольным разрядом.....	37
1.3. Твердотельные лазеры.....	38
1.3.1. Введение.....	38
1.3.2. Механизм генерации твердотельных лазеров.....	38
1.3.3. Типы твердотельных лазеров.....	41
1.3.4. Активные элементы твердотельных лазеров.....	44
1.3.5. Элементная база активных элементов.....	47
1.3.6. Схема накачки импульсного твердотельного лазера.....	51
1.4. Полупроводниковые лазеры.....	53
Раздел 2. ОПТИКА ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ.....	58
2.1. Формирование, свойства, транспортировка и фокусировка лазерных пучков.....	58
2.1.1. Пучки простейшей структуры.....	58
2.1.2. Фазовый объем и габаритный фазовый объем (ГФО) лазерных пучков.....	60
2.1.3. Формирование лазерного излучения в резонаторе.....	62
2.1.3.1. Оптические схемы технологических лазеров.....	62
2.1.3.2. Резонаторы со сферическими зеркалами.....	65
2.1.3.3. Схемы резонаторов для формирования одномодового пучка.....	71
2.1.3.4. Схемы лазеров с модуляцией добротности резонатора.....	72
2.1.3.5. Усиление излучения.....	75
2.1.3.6. Расходимость излучения лазерного пучка.....	76
2.1.3.7. Транспортировка лазерного пучка в свободном пространстве..	77
2.1.3.8. Транспортировка пучка с помощью оптоволоконного тракта ...	78
2.1.3.9. Фокусировка лазерного пучка.....	81

2.2. Элементная база ЛТУ, оптика лазерных технологических установок.....	86
2.2.1. Зеркала резонаторов	86
2.2.2. Линзы, выходные окна, делительные пластины.....	89
2.2.3. Диафрагмы.....	92
2.2.4. Оптические затворы	93
2.2.5. Спектральные селекторы	96
Раздел 3. ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРОВ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ И УСТРОЙСТВАХ	97
3.1. Технология лазерной закалки различных материалов	97
3.2. Лазерное легирование и наплавка	101
3.3. Лазерная сварка	103
3.3.1. Лазерная сварка малых толщин.....	105
3.3.2. Лазерная сварка металлов с глубоким проплавлением.....	109
3.3.3. Технологические особенности лазерной сварки конструкционных материалов.....	113
3.4. Лазерная резка	115
3.4.1. Резка металлов.....	115
3.4.2. Лазерная резка неметаллов	121
3.5. Размерная обработка.....	124
3.6. Другие технологические применения лазеров.....	126
3.6.1. Лазерный дальномер.....	126
3.6.2. Лазерные установки военного назначения.....	128
3.6.3. Лазерная связь	129
3.6.4. Лазерный управляемый термоядерный синтез	132
Раздел 4. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ.....	136
4.1. Классификация и характеристики ЛТК	136
4.2. Тенденции и проблемы развития лазерного технологического оборудования	140
4.3. Промышленные образцы ЛТК	141
4.3.1. Промышленные образцы ЛТК на базе твердотельных лазеров ($\lambda = 1,06$ мкм).....	141
4.3.2. ЛТК на базе CO ₂ -лазеров	145
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	147

ВВЕДЕНИЕ В КУРС

В данном курсе основное внимание будет уделено изучению основ лазерной техники и технологии, принципов построения и работы лазерных технологических установок и комплексов, будут рассмотрены основные области применения лазерных установок в различных областях народного хозяйства (промышленная обработка материалов, энергетика, связь, медицина, информационно-вычислительная техника и др.). Более подробно будут рассмотрены основные аспекты использования мощных лазеров для обработки материалов. Применение лазеров в различных технологических процессах основано на уникальных свойствах лазерного пучка, таких как высокая когерентность, монохроматичность, интенсивность излучения и малая расходимость лазерного пучка. Эти свойства позволяют использовать лазер практически во всех областях деятельности человека.

Мировой лазерный рынок

Объем мирового рынка лазеров и лазерных установок постоянно растет и финансирование этой области составляют достаточно большую сумму денег. Так, объем мирового рынка лазеров в 2001 году составил 5,1 млрд евро. Наибольшую его часть заняли лазерные источники излучения для телекоммуникаций (2,1 млрд евро), за ними следуют лазеры для обработки материалов (1,45 млрд евро), для офисного оборудования и бытовой электроники (0,75 млрд евро), для медицинских применений (0,55 млрд евро), для измерений и исследований (0,24 млрд).

Рынок лазерных установок и систем, т. е. аппаратуры на основе лазеров, более чем в 10 раз превышает рынок собственно источников лазерного излучения. Объем продаж лазерных систем за 2001 год оценивается в 65 млрд евро, в том числе лазерных технологических установок – 4,3 млрд евро. ЛТУ для резки и сварки было продано на 2 млрд, для маркировки – на 0,8 млрд, лазерного оборудования для обработки полупроводников, печатных плат и других компонентов микроэлектроники – на 1,3 млрд евро (эта последняя категория включает в себя, например, аппаратуру для ремонта оптической памяти, триммеры для электронных плат и системы сверления сквозных отверстий). Отдельно от вышперечисленных учитываются лазерные системы для микролитографии (создания рельефа на полупроводниковых пластинах), спрос на которые в 2001 году составил 2,6 млрд евро. В части медицинских лазерных приборов и аппаратов рынок систем достиг в 2001 году 1,3 млрд евро, причем доминировали хирургические установки – 850 млн евро с учетом аппаратов для офтальмологии и рефрактивной хирургии. Лазерных систем

для косметологических применений (удаление волос, очистка поверхности кожи и т. д.) было продано на 450 млн евро.

В последующие годы лазерный рынок находился в фазе быстрого роста и к настоящему времени еще далек от насыщения.

Общая характеристика лазерных технологий по обработке материалов

Одной из принципиальных особенностей лазерного луча является возможность громадной концентрации его энергии в зоне обработки, которая недостижима для других источников тепла. Лазерное излучение может нагревать, плавить и испарять любые материалы. Воздействие лазерного излучения на материалы характеризуется общими положениями, связанными с поглощением и отражением излучения, а также распространением поглощенной энергии по объему материала за счет теплопроводности.

На участке воздействия излучения материал (металл) нагревается до первой критической температуры разрушения – плавления. При дальнейшем поглощении излучения металл расплавляется и от участка воздействия излучения в объем материала начинает перемещаться фазовая граница плавления. Наряду с этим энергетическое воздействие лазерного излучения приводит к последующему повышению температуры, достигающей второй критической температуры разрушения – кипения, когда имеет место активное испарение. Скорость испарения экспоненциально зависит от температуры и максимального своего значения достигает при стационарной температуре испарения, когда скорости фазовых границ плавления и испарения одинаковы.

В зависимости от плотности мощности лазерного излучения количество расплавленного металла, стационарная температура, скорость плавления и испарения будут различными. Указанные параметры характеризуют процесс разрушения, и, следовательно, изменяя плотность мощности и время воздействия лазерного излучения на металлы, можно управлять этим процессом.

Значительное влияние на интенсивность процессов нагрева и разрушения также оказывает поглощательная способность материала, зависящая от температуры поверхности, длины волны, поляризации и угла падения излучения на обрабатываемую поверхность.

В целом при обработке материалов можно выделить ряд преимуществ лазерной технологии перед другими:

- высокая скорость обработки материала;
- высокое качество обработки;
- высокая скорость нагрева и охлаждения ($10^6 \dots 10^8$ К/с);

- возможность обработки локальных участков поверхности сложной конфигурации и труднодоступных мест;
- безконтактность процесса, обеспечивающая легкость автоматизации процесса;
- малая зона термического влияния, отсутствие деформации деталей;
- высокая точность измерений;
- низкий уровень шума;
- малое количество грата (выброс наплава с противоположной стороны металла при резке), не требующее окончательной механической обработки;
- малый объём отработанных газов;
- возможность обработки широкого диапазона материалов;
- возможность выполнения резки и маркировки одним и тем же инструментом;
- возможность выполнения малых отверстий, тонких швов и тонких резов;
- возможность выполнения V- и Y-образных резов для подготовки кромок заготовок под сварку;
- возможность изменения угла резки при обработке гнутых деталей и центровке крупногабаритных листов;
- универсальность установок, т. е. возможность выполнения резки, сверления и фрезеровки на одной и той же установке.

Данные преимущества стимулировали внедрение лазерных технологий по обработке материалов почти повсеместно – в машиностроении, производстве электроники, в медицине, в энергетике, взрывном деле и т. д. Важность и перспективность лазерной технологии при обработке материалов доказывается тем, что на мировом рынке мощные лазеры представлены наибольшим удельным весом. К таким лазерам в настоящее время относятся твердотельные (Nd), газовые (СО₂ и эксимерные лазеры) и полупроводниковые лазеры. Так, для машиностроительной отрасли хозяйства на мировом рынке сбыта технологические системы на основе наиболее мощных лазеров представляют примерно следующее соотношение:

- на основе твердотельных лазеров ~ 33 %;
- на основе эксимерных лазеров ~ 47 %;
- на основе СО₂-лазеров ~ 19 %.

Общая характеристика технологического лазера и систем на его основе

Технологический лазер (ТЛ) – это источник излучения, имеющий определенные заданные параметры, плюс необходимый комплект запасных частей. ТЛ является основным компонентом технологической установки. Функциональная схема ТЛ на базе твердотельного лазера приведена на рис. 1.

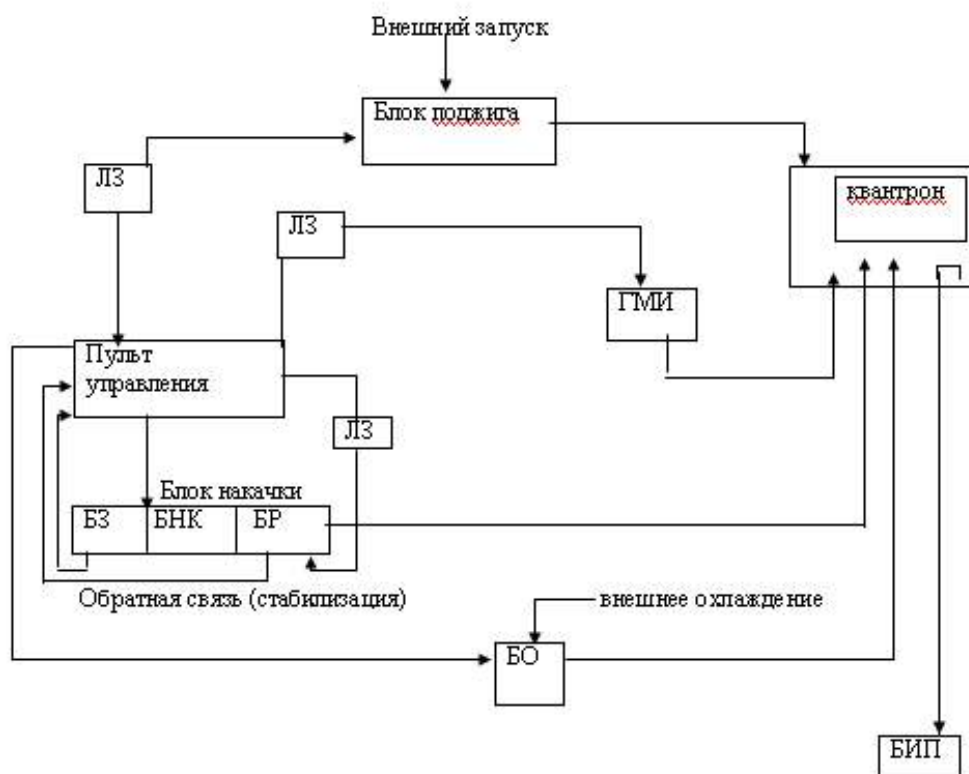


Рис. 1. Функциональная схема ТЛ на базе твердотельного лазера:
БЗ – блок зарядный; БНК – блок накопления энергии из конденсаторов;
БР – блок разрядный; БП – блок поджига;
ГМИ – генератор моделирующих импульсов; БО – блок охлаждения;
БИП – блок измерения параметров излучения; ЛЗ – линии задержки

Технологические лазеры должны отличаться гибкостью (перестраиваемость на различные виды обработки), безотходностью, малыми габаритными размерами производственной линии, бесшумностью, надежностью и воспроизводимостью обработки, возможностью полной автоматизации. Основным требованием к ТЛ является высокая мощность в сочетании с высоким качеством пучка, безопасность и надежность в работе (высокий ресурс, не менее 10^4 час), стабильность параметров излучения.

В импульсном режиме работы лазера стабилизация накачки задана обратной связью пульта управления с блоком заряда. В непрерывном режиме – с блоком разряда. В газовых лазерах используется другая блок-схема, а вместо квантрона используется газоразрядная камера с возможной прокачкой рабочего газа.

Лазерная технологическая установка (ЛТУ) – это ТЛ с внешним оптическим трактом, компонентом внешней оптики и запчастями.

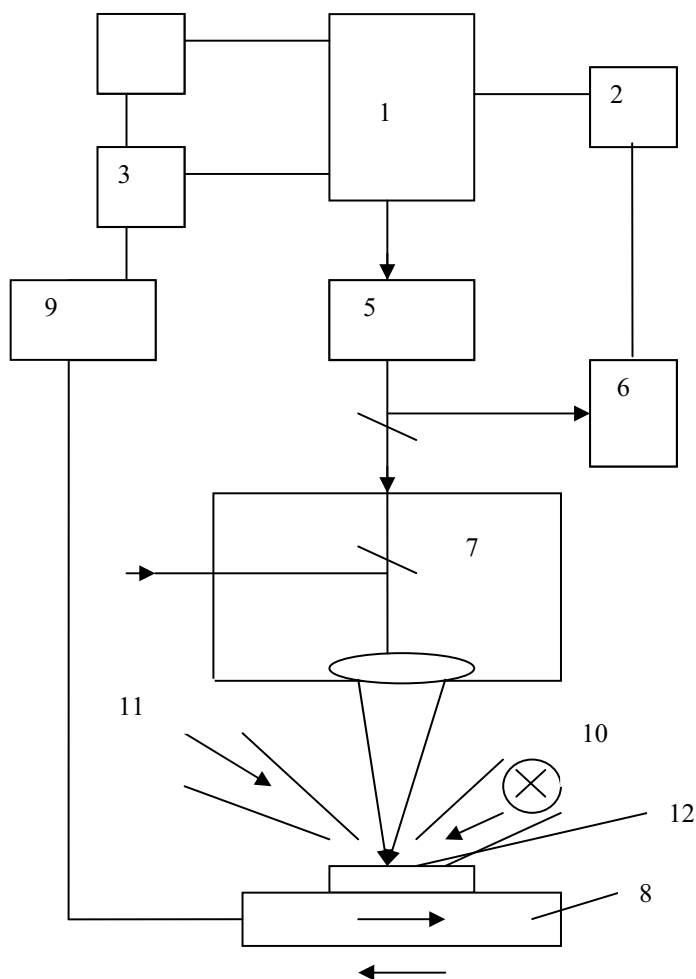


Рис. 2. Структурная схема ЛТК:

- 1 – излучатель на базе твердотельного лазера; 2 – источник питания;
 3 – блок поджига; 4 – блок охлаждения; 5 – устройство дозирования энергии;
 6 – система стабилизации выходной энергии (автоматическая);
 7 – оптическая система для фокусировки и наблюдения; 8 – рабочий стол;
 9 – программирующее устройство; 10 – подсветка;
 11 – устройство подачи газа; 12 – образец*

Лазерный технологический комплекс (ЛТК) – это ЛТУ, снабженная манипулятором изделий или оптики, вспомогательной технологической оснасткой (ВТО) и общей системой управления для проведения технологических операций. В случае применения автоматизированного манипулятора и связи между системами управления лазером и манипулятором комплекс считается автоматизированным ЛТК (АЛТК). ЛТК и АЛТК разделяются на универсальные и специализированные.

ВТО может включать:

- оборудование для подготовки технологических операций (устройства нанесения покрытий, легирующих порошков, загрузчики деталей);
- датчики и устройства для контроля за ходом технологического процесса (это визуализаторы лазерного излучения (ЛИ), пирометры, датчики зазора между обрабатываемым материалом и оптико-фокусирующей головкой, визуализаторы могут быть снабжены телевизионными экранами и координатной сеткой и т. д.);
- оборудование для подачи защитного или рабочего газа, водяного или воздушного охлаждения, зажимы, фиксаторы и др.;
- средства защиты и техники безопасности;
- системы контроля качества обрабатываемых изделий (твердомеры, микроскопы и др.).

Упрощенная структурная схема ЛТК приведена на рис. 2. Основными параметрами, характеризующими ЛТК, следует считать энергию (мощность), длительность импульса и диаметр светового пятна на обрабатываемой поверхности. ЛТК может быть снабжена системой формирования и транспортировки пучка, системой расщепления пучка на несколько позиций и системой манипулирования (сканирования) пучка. Можно выделить два канала в оптике ЛТК – энергетический и канал визуального наблюдения.

Обычно в ЛТК используются мощные твердотельные (Nd) или газовые (CO₂ и эксимерные) лазеры, которые обеспечивают лазерные пучки с мощностью от 100 Вт до 5 кВт. Далее в курсе будет более подробно говориться именно об этих лазерах и их применении.

Раздел 1

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЛАЗЕРЫ. УСТРОЙСТВО, РАБОТА И ПАРАМЕТРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ

1.1. Экимерные лазеры

1.1.1. Введение

Экимерные лазеры являются наиболее эффективными и мощными источниками когерентного излучения в ультрафиолетовой области спектра. Данные лазеры работают на экимерных молекулах, которые существуют только в возбужденном состоянии. Основное состояние соответствует взаимному отталкиванию атомов и в этом состоянии молекула не существует. Однако, поскольку кривая потенциальной энергии возбужденного состояния имеет минимум, то молекула может существовать в возбужденном состоянии в димерной форме. Такая молекула называется экимером (аббревиатура английского слова *excited dimer* – возбужденный димер). Предположим теперь, что в некотором объеме каким-либо образом создано большое число экимеров, тогда генерация может быть получена на электронном переходе между верхним (связанным) и нижним (свободным) состояниями (связанно-свободный переход). Соответствующий лазер называется экимерным. Он характеризуется двумя необычными, но важными свойствами, благодаря тому, что основное состояние соответствует взаимному отталкиванию атомов.

1. Как только в результате генерации молекула перейдет в основное состояние, она немедленно диссоциирует. Это означает, что нижний лазерный уровень будет всегда пустым.

2. Не существует четко выраженных вращательно-колебательных переходов, и переход является относительно широкополосным. Однако следует заметить, что в некоторых экимерных лазерах кривая потенциальной энергии основного состояния не соответствует чистому взаимному отталкиванию, а обладает неглубоким минимумом. В этом случае переход происходит между верхним связанным состоянием и нижним (слабо) связанным состоянием (связанно-связанный переход). Однако поскольку основное состояние является лишь слабосвязанным, молекула в этом состоянии претерпевает быструю диссоциацию либо сама (преддиссоциация), либо вследствие первого же столкновения с другой молекулой газовой смеси.

Первый эксимерный лазер был создан в 1970 г. на молекулах Xe_2 . Однако его эффективность была очень низка. В 1975 г. была получена генерация на молекулах галогенидов благородных газов. В таких лазерах атом инертного газа (например, Ar, Kr, Xe) в возбужденном состоянии соединяется с атомом галогена (например, F, Cl), что приводит к образованию эксимера галогенидов инертных газов. Некоторые авторы называют такие молекулы эксиплексы. В результате появились лазеры на молекулах XeCl (длина волны $\lambda = 308$ нм), KrF ($\lambda = 248$ нм), ArF ($\lambda = 193$ нм), XeF ($\lambda = 351$ нм) и т. д. Новый класс высокоэффективных источников когерентного излучения перекрыл большую область спектрального диапазона в ультрафиолетовой области.

В результате исследований выяснилось, что для эффективного возбуждения лазеров лучше всего подходит объемный электрический разряд и пучок ускоренных электронов. Наиболее перспективными оказались лазеры на молекулах XeCl и KrF , эффективность генерации которых достигала 5 и 10 % соответственно. Наряду с высокой эффективностью в данных лазерах была показана возможность для масштабирования их

активного объема, что позволяет проектировать и создавать системы с выходной энергией в единицы килоджоулей. На рис. 1.1.1 приведены типичные значения импульсной энергии электроразрядного лазера, в котором использовалась различная газовая смесь для получения генерации на различных длинах волн.

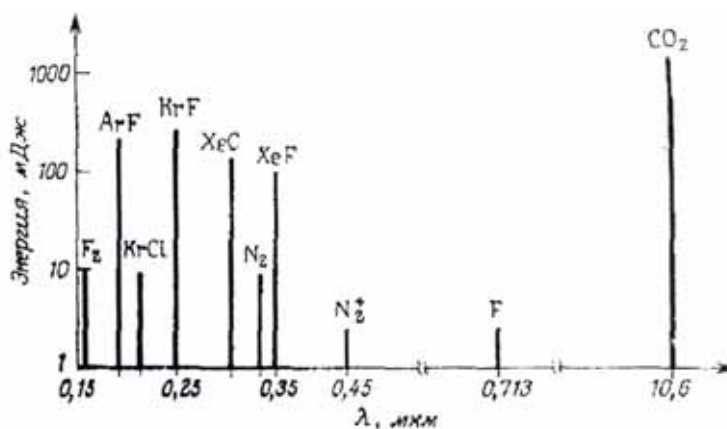


Рис. 1.1.1. Параметры излучения эксимерных, CO_2 -, N_2 - и F_2 -лазеров, полученных на одной и той же электроразрядной камере

позволяет проектировать и создавать системы с выходной энергией в единицы килоджоулей. На рис. 1.1.1 приведены типичные значения импульсной энергии электроразрядного лазера, в котором использовалась различная газовая смесь для получения генерации на различных длинах волн.

1.1.2. Механизм генерации лазера на молекуле KrF

Рассмотрим теперь подробнее принцип работы KrF -лазера, так как он представляет собой один из наиболее мощных и эффективных лазеров данного класса. На рис. 1.1.2 приведена диаграмма потенциальной энергии молекулы KrF . Верхний лазерный уровень является состоянием с ионной связью, которое на большом расстоянии отвечает состоянию 2P положительного иона Kr и состоянию 1S отрицательного иона F.

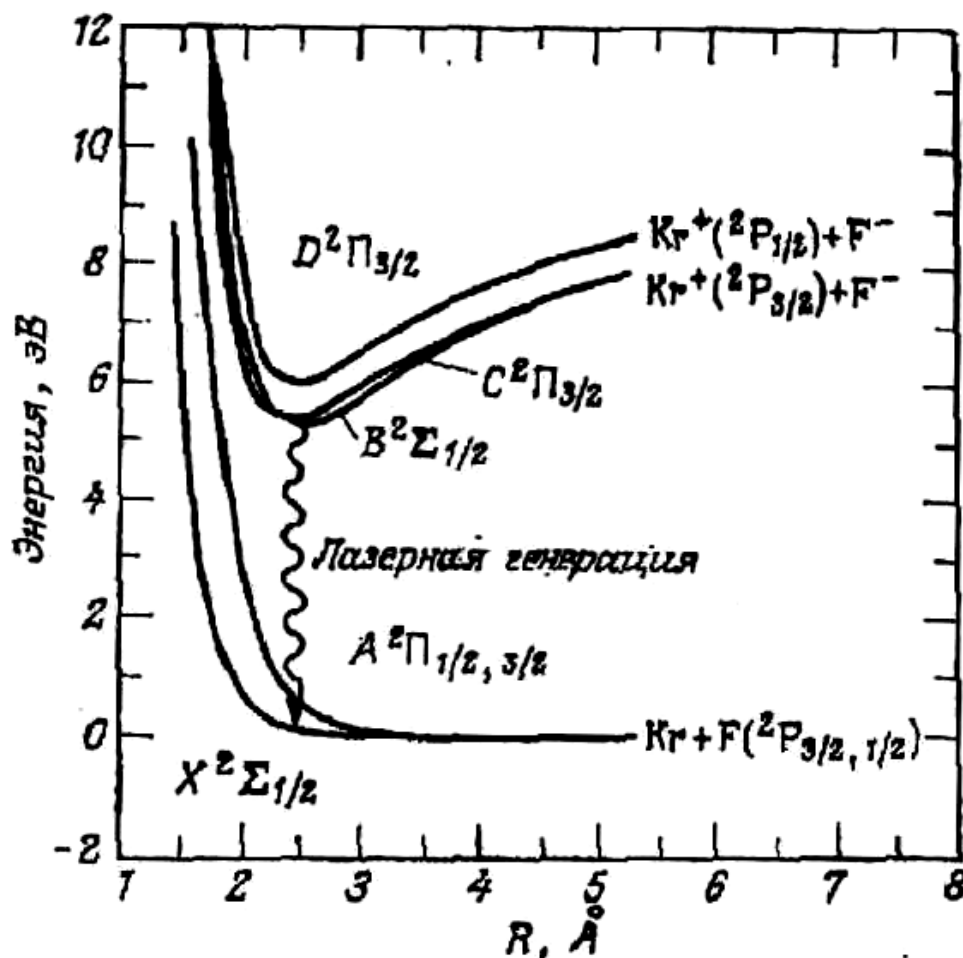
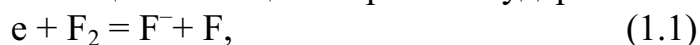


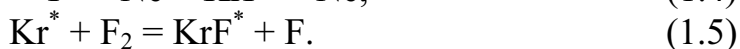
Рис. 1.1.2. Энергетические уровни эксимерного лазера на молекуле KrF

Нижнее состояние имеет ковалентную связь и при большом расстоянии отвечает состоянию 1S атома криптона и состоянию 2P атома фтора. Таким образом, в основном состоянии атомные состояния инертного газа и галогена меняются местами. В результате взаимодействия соответствующих орбиталей верхнее и нижнее состояния при малых межъядерных расстояниях расщепляются на несколько подуровней. Генерация происходит на переходе $B^2\Sigma_{1/2} - X^2\Sigma_{1/2}$ ($B - X$), поскольку он имеет наибольшее сечение. Заметим, что при переходе излучающий электрон передается от иона F^- иону Kr^+ .

Образование эксимерных молекул происходит в разрядной или пучковой плазме за счет кинетических процессов. Выделим основные, которые отвечают за образование эксимерных молекул в разрядном KrF лазере. Обычно разряд зажигается в газовой смеси $Ne-Kr-F_2$, при этом происходит возбуждение и ионизация частиц электронным ударом:



В результате взаимодействия этих частиц образуется эксимерная молекула KrF^* .



Далее, за счет столкновительного тушения другой частицей, спонтанного или индуцированного высвечивания, происходит диссоциация молекулы на атомы Kr и F. Поскольку лазерное излучение – это индуцированное излучение, то нам важен этот процесс, который идет по реакции



с высвечиванием кванта света с энергией $h\nu$ на длине волны 248 нм.

Поскольку время жизни верхнего лазерного уровня мало (5...10 нс), то такой лазер работает только в импульсном режиме и длительность импульса генерации обычно составляет десятки наносекунд.

1.1.3. Схемы предьонизации разрядного промежутка

Поскольку все эксимерные лазеры работают на газовых смесях атмосферного давления, то для зажигания объемного разряда накачки необходимо обеспечивать предварительную ионизацию газовой смеси в разрядном промежутке. Кроме этого, для уменьшения неоднородностей электрического поля в разрядном промежутке электроды делают специальной формы, с определенным профилем. Наибольшее распространение получили профили Роговского и Чанга. Частичного повышения однородности создаваемой плазмы можно добиться также путем секционирования одного из электродов, обычно катода (рис. 1.3, а). Однако наиболее эффективным способом создания однородного импульсного разряда при повышенных давлениях является предварительная фотоионизация разрядного промежутка с помощью ультрафиолетового излучения специально создаваемых дополнительных искровых разрядов. Для объяснения появления фотоэлектронов в газовом объеме при УФ-облучении от искр предложено несколько процессов.

1. Фотоэмиссия электронов из катода. Работа выхода для многих материалов, из которых изготавливаются катоды, как правило, низка, поэтому фотоэмиссия может возникать при такой длине волны ультрафиолетового излучения, когда оно способно глубоко проникать в газ при высоком давлении.

2. Процесс двухступенчатой или многоступенчатой ионизации компонент газовой смеси, при котором на образование одного электрона затрачивается несколько фотонов.

3. Возбуждение атомов или молекул, способных при столкновении с другими тяжелыми частицами образовывать свободные электроны.

4. Фотоионизация примесей с достаточно низким потенциалом ионизации.

Обычно эти искровые разряды зажигаются следующим образом.

1. Между сетчатым катодом (1) основного промежутка и поверхностью диэлектрика (3), покрывающего вспомогательный электрод (4) (рис. 1.1.3, б).

2. Между выступающими участками профилированного катода и поверхностью расположенных на катоде изоляторов (3), внутри которых располагается проводник (4), соединенный через небольшую емкость с анодом (2) (рис. 1.1.3, в).

3. Между вспомогательными электродами (5), расположенными вблизи основного разрядного промежутка (рис. 1.1.3, г).

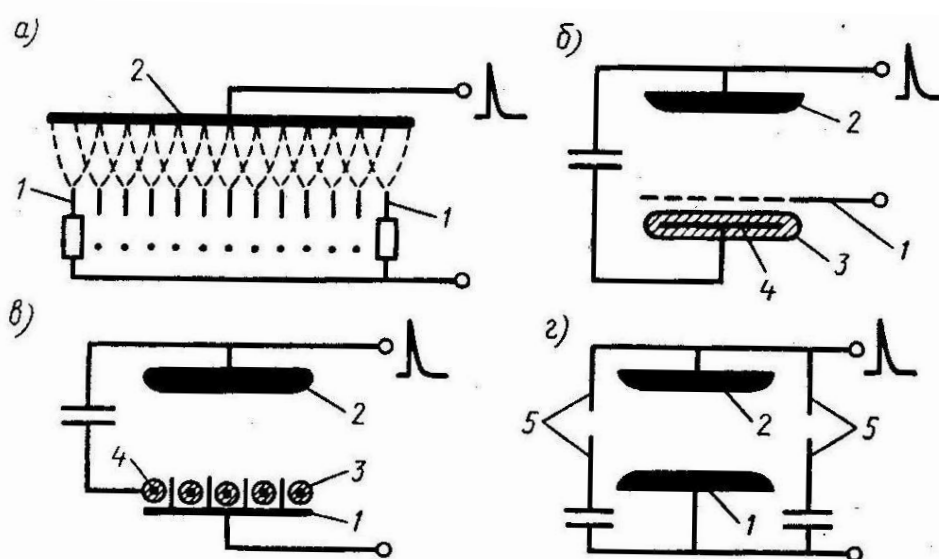


Рис. 1.1.3. Схемы получения однородного электрического разряда в газах при повышенных давлениях:

1 – катод, 2 – анод, 3 – диэлектрик, 4 – металлический проводник, 5 – вспомогательные электроды

Показанные на рис. 1.1.3 варианты схем естественно не охватывают все практические системы предыонизации, используемые в технологических лазерах. Иногда для предыонизации используют поверхностный разряд по диэлектрику, зажигаемый между кромками металлической фольги, или другие схемы. Однако основное назначение всех этих систем одно и то же – обеспечить создание однородной и, по возможности, достаточно интенсивной ионизации газа в разрядном промежутке к моменту начала разряда. Для зажигания объемного разряда в больших объемах обычно используют предыонизацию рентгеновским излучением или пучком ускоренных электронов.

1.1.4. Электрические схемы возбуждения

Для возбуждения эксимерных лазеров требуется короткий (10...100 нс) и мощный импульс (более 100 МВт). Формирование таких импульсов не является тривиальной задачей, и такие импульсы могут быть получены только с помощью специальных электрических схем. Общий принцип таких схем заключается в накоплении необходимой энергии в конденсаторе и быстрая его разрядка на лазерный (разрядный) промежуток. Обычно в электроразрядных системах стремятся к режиму согласования, при котором сопротивление разрядной плазмы R_p должно быть близко к волновому сопротивлению разрядного контура

$$R_p \cong \sqrt{L/C}. \quad (1.7)$$

Решение задачи ввода в разряд определенной энергии $E_s = CU_0^2/2$, накопленной в емкости, за короткое время $\tau_b \sim \sqrt{L/C}$ предполагает наличие минимальной индуктивности разрядного контура L (4...10 нГ). Все это достаточно непросто реализовать на практике.

Рассмотрим наиболее часто используемые схемы возбуждения, которые используются не только для эксимерных лазеров, но и любых газовых лазеров с быстрой поперечной накачкой. Наиболее простая схема включает накопительную емкость C_1 , коммутатор K , индуктивность разрядной цепи L и разрядный промежуток с лазерной смесью газов РП (рис. 1.1.4). Емкость C заряжается от высоковольтного источника до напряжения $U = 20...30$ кВ и включается коммутатором на разрядный промежуток, обеспечивая на нем напряжение U_0 . Преимущество такой схемы заключается в ее простоте. К недостаткам можно отнести следующее: во-первых, к разрядному промежутку нельзя приложить напряжение более U_0 ; во-вторых, коммутатор, который обычно имеет определенное активное сопротивление, стоит в разрядном контуре и забирает существенную часть (до 50 %) энергии, накопленной в емкости C .

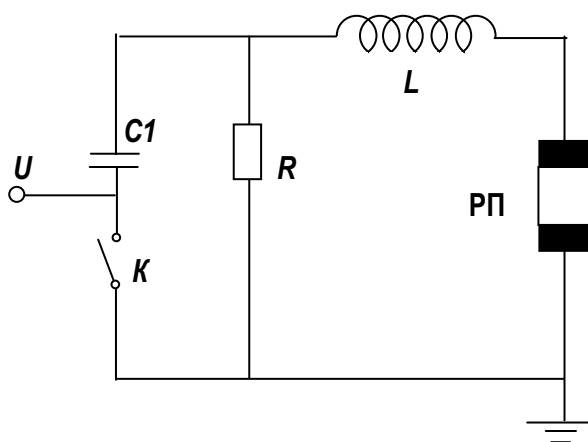


Рис. 1.1.4. Одноконтурная схема возбуждения газовой смеси

В связи с этим, для накачки более часто используется двухконтурная схема, которая позволяет исключить коммутатор из разрядной цепи и повысить напряжение на промежутке до величины $1,5 \dots 2U_0$. Два варианта такой схемы приведены на рис. 1.1.5. Накопленная энергия в емкости $C1$ после срабатывания тиратрона частично или полностью передается в емкость $C2$, при разрядке которой через разрядный промежуток происходит накачка лазера (создание активной среды). При этом величина напряжения U_2 на емкости $C2$ зависит от соотношения емкостей $C1$ и $C2$ и может быть определена из следующего выражения:

$$U_2 = 2U_0 C1 / (C1 + C2). \quad (1.8)$$

Данная схема позволяет варьировать не только величину напряжения на разрядном промежутке, но и длительность импульса разрядного тока. Искровые промежутки для предыонизации могут располагаться в разных участках цепи, однако, при накачке от емкости $C2$, преимущество имеет вариант Б, так как при этом уменьшаются активные потери в разрядном контуре (отсутствуют искровые промежутки).

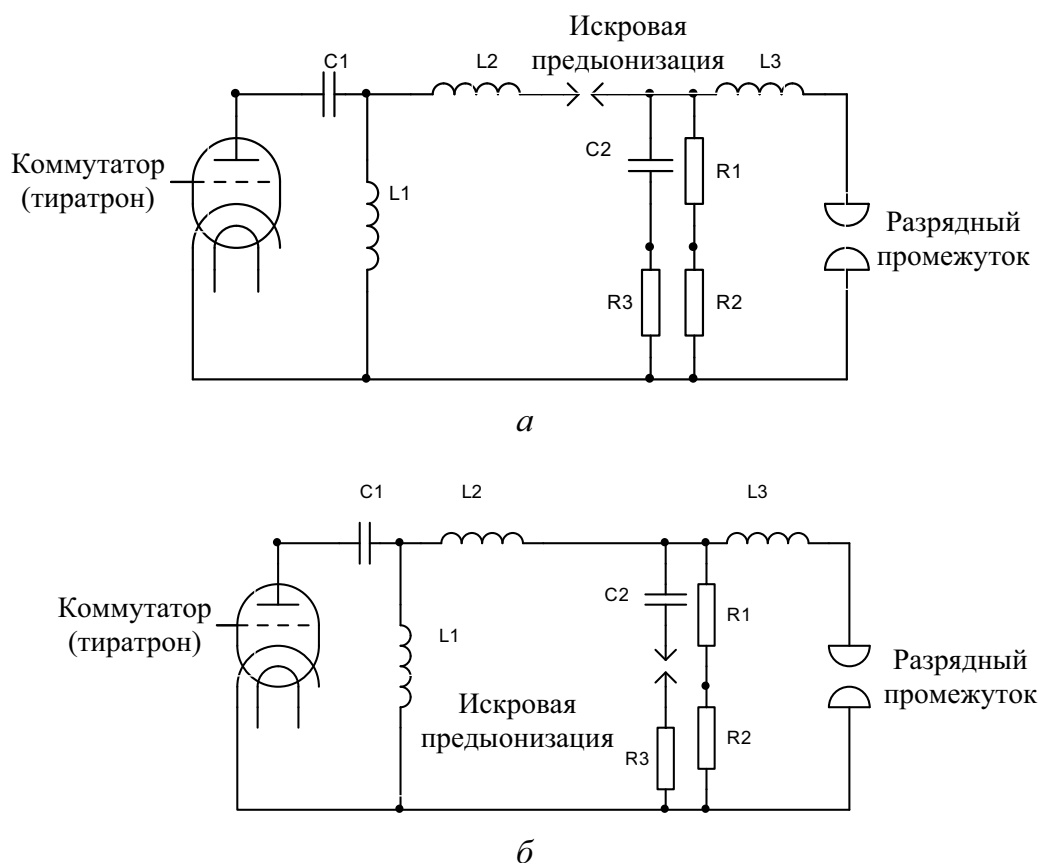


Рис. 1.1.5. Двухконтурная эквивалентная схема зажигания разряда:
 а – искровая предыонизация находится в зарядном контуре;
 б – искровая предыонизация находится в разрядном контуре

Иногда используют схему накачки (генератор), которую называют LC – инвертор (рис. 1.1.6). В такой схеме накопительные конденсаторы C_1 и C_2 заряжаются через сопротивление R_3 . При коммутации разрядника в контуре LC_2 (L – распределенная индуктивность контура, на схеме не отображена) начинается колебательный процесс и через время $\pi\sqrt{LC_2}$ происходит перезарядка емкости C_2 до противоположного знака, в результате на разрядной емкости C_p возникнет удвоенное напряжение $2U_0$ (теоретически, реально увеличение напряжения $N = 1,5\dots 1,8$). Емкость C_p может зарядиться до этого напряжения или более (в зависимости от соотношения емкостей C_1 , C_2 и C_p). При достижении напряжения пробоя разрядного промежутка РП зажигается разряд и происходит накачка лазера.

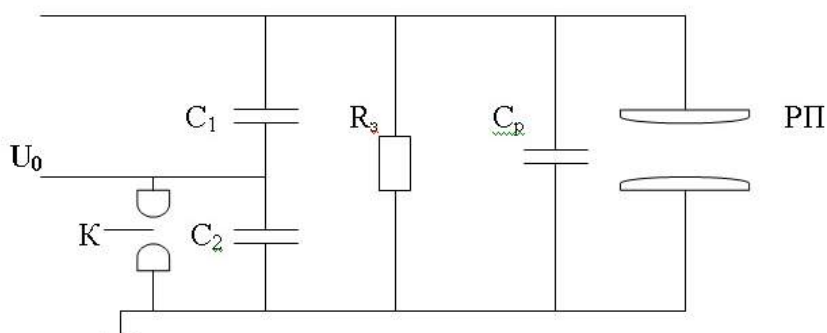


Рис. 1.1.6. LC – генератор, или генератор с инвертированием напряжения на накопительных емкостях:

C_1 и C_2 – накопительные емкости; R_3 – зарядное сопротивление;
 C_p – разрядная емкость; РП – разрядный промежуток с лазерной смесью;
 K – разрядник

К достоинствам этой схемы питания следует отнести небольшие значения питающих напряжений U_0 , более высокое, по сравнению со схемой перезарядки емкости на емкость, нарастание напряжения на разрядном промежутке и ее величина. К недостаткам такой схемы можно отнести примерно удвоенное число накопительных конденсаторов, что ведет к увеличению габаритов и стоимости изделия.

1.1.5. Прокачка лазерной смеси в разрядном промежутке

В отличие от режима одиночных импульсов, импульсно-периодический режим работы (ИПР) имеет свои особенности, обусловленные влиянием возмущений, вызванные предыдущими разрядными импульсами на последующие импульсы. Данное влияние вызывается следующими явлениями:

1. Изменение состава рабочей смеси.
2. Влияние пограничных слоев на электродах.
3. Влияние ударных волн.

4. Влияние акустических колебаний.
5. Адиабатическое расширение пробки нагретого газа.

Наличие возмущений плотности газа при ИПР приводит к неоднородному распределению плотности газа в разрядном объеме, и, как следствие, происходит контрагирование разряда, приводящее к неоднородности распределения выходного излучения по сечению пучка, к уменьшению выходной мощности излучения, к механическим повреждениям электродов и т. д. Для избежания выше перечисленных последствий необходимо осуществлять смену газа в разрядном промежутке.

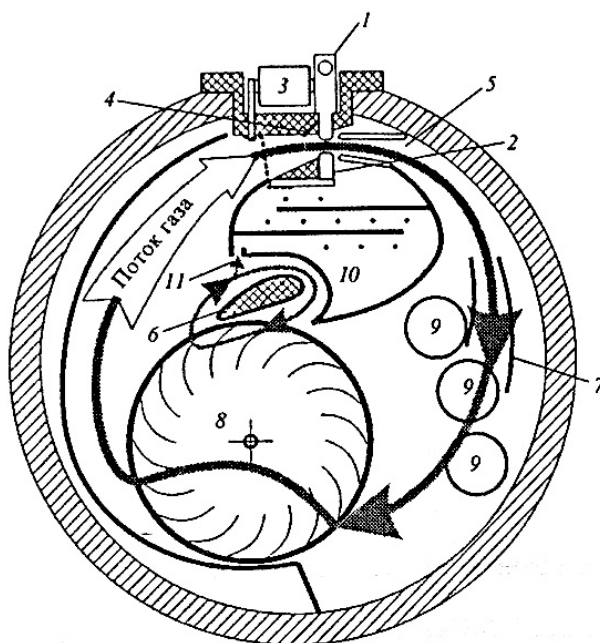


Рис. 1.1.7. Схема прокачки лазерной смеси в газовом лазере с поперечной накачкой:

- 1 – катод, 2 – анод, 3 – разрядная емкость,
4 – ножевой предыонизатор, 5 – диффузор, 6 – вихреобразователь,
7 – направляющие потока, 8 – диаметральный вентилятор,
9 – радиаторы охлаждения, 10 – электростатический фильтр,
11 – вход газа в электростатический фильтр*

На рис. 1.1.7 приведена схема прокачки лазерной смеси в газовом лазере с поперечным возбуждением. Расчеты и эксперименты показывают, что скорость прокачки газа должна быть такой, чтобы к моменту начала следующего импульса успевала происходить смена газа в промежутке в полтора раза большем чем размер электродов в направлении прокачки. В этом случае влияние адиабатического расширения пробки нагретого газа от предыдущих разрядных импульсов на последующие будет незначительно. Кроме скорости прокачки, важным параметром

является профиль газового потока в разрядном промежутке. В лазере, работающем в ИПР, скорость прокачки в центре разрядного промежутка должна быть 2...30 м/с, в зависимости от частоты следования импульсов. При этом мощность генерации должна линейно возрастать при увеличении частоты следования импульсов.

Газовый поток в камере обычно создается диаметральной вентилятором, который приводится в движение электродвигателем через магнитную муфту.

1.1.6. Элементная база эксимерных лазеров

К основным компонентам лазера можно отнести следующие: накопительные и разрядные конденсаторы, коммутаторы, оптические элементы, источники высокого напряжения, газы для приготовления лазерной смеси.

В электроразрядных лазерах в основном используются керамические высоковольтные конденсаторы. Среди российских конденсаторов можно выделить следующие марки: UNV, K15-10, K15-4, КВИ, среди импортных – TDK-UHV. Данные конденсаторы имеют емкость от 0,1 нФ до 10 нФ и могут работать при напряжении от 10 до 40 кВ. Они являются компактными и малоиндуктивными, что позволяет их использовать в электрических схемах лазера для обеспечения мощных и коротких импульсов (10...100 нс) накачки. Иногда для мощных лазеров используются бумаго-масляные конденсаторы типа ИК, ИКЧ. Они имеют емкость 10...100 нФ и работают при напряжении от 10 до 100 кВ.

В качестве коммутаторов в эксимерных лазерах используются разрядники и тиратроны. Наиболее часто используются тиратроны типа ТГИ, ТПИ, ТДИ, которые могут работать с частотой следования импульсов от единиц Гц до кГц при напряжении от 10 до 50 кВ и коммутировать токи 1...50 кА. Реже используются разрядники типа РУ-61, РУ-85, РУ-89. Они дешевле и проще, но работают только с частотой 1...50 Гц.

Поскольку эксимерные лазеры работают в УФ-области спектра, то и оптические элементы должны пропускать и отражать в этой спектральной области. В связи с этим в качестве окон делительных пластин и линз используются такие материалы, как плавленый кварц, кристаллический кварц, CaF_2 , MgF_2 , LiF_2 . Зеркала обычно напыляют Al с высоким коэффициентом отражения (85 %) или используют диэлектрические и многослойные покрытия на кварцевой подложке.

1.1.7. Эксимерные лазеры, разработанные в ИСЭ СОРАН, г. Томск

Введение

В Институте сильноточной электроники СО РАН была разработана и создана целая серия мощных эксимерных лазеров, возбуждаемых электрическим разрядом и электронным пучком с энергией в импульсе от долей джоуля до сотен джоулей. В настоящем пособии описывается ряд лазеров, созданных в лаборатории газовых лазеров данного института.

Разработанные лазеры можно разбить на две группы – частотные лазеры – для различных технологий и моноимпульсные лазеры – для научных исследований. К первой группе относятся лазеры серии EL. Данные лазеры могут работать с частотой повторения до 100 Гц при полном КПД до 2,6 %, имеют большой ресурс лазерной смеси ($>10^6$ импульсов), могут работать на разных длинах волн (350 нм, 308 нм, 248 нм, 193 нм).



*Рис. 1.1.8. Внешний вид эксимерного лазера EL-500-100:
 $E = 0,5$ Дж, $f = 100$ Гц, $\lambda = 308$ нм*

Например, на длине волны 308 нм лазеры производят энергию от 0,2 до 0,6 Дж в импульсе с длительностью 30 нс.

1.1.7.1. Частотные электроразрядные лазеры

В ИСЭ СО РАН (г. Томск) были разработаны эксимерные ХеСl-лазеры EL-350-10, EL-200-50 и EL-500-100, которые генерируют энергию 200...500 мДж и работают с частотой повторения импульсов 10...100 Гц .

Для накачки лазеров используется типичная двухконтурная схема (рис. 1.1.5, а). Предыонизация разрядного промежутка осуществляется УФ-излучением, которое возникает при срабатывании искровых промежутков, установленных в электрической цепи. На рис. 1.1.8 приведена фотография

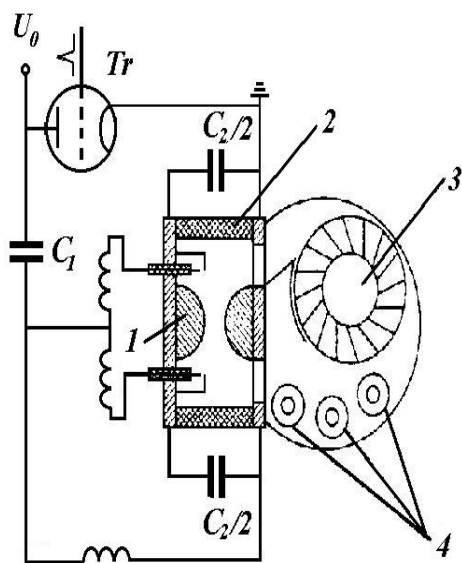


Рис. 1.1.9. Схема лазера:
 1 – разрядные электроды,
 2 – диэлектрическая камера,
 3 – вентилятор, 4 – холодильник

эксимерного лазера EL-500-100, а на рис. 1.1.9 – его принципиальная схема. Конденсатор $C_1 = 107$ нФ (состоял из конденсаторов TDK UHV-6A, 2700 pF & 30 kV) заряжается от источника постоянного напряжения до $U_0 = 24$ кВ. В качестве коммутатора использован тиратрон ТПИЗ-10к/25. После коммутации тиратрона за время ~ 150 нс происходит эффективная перезарядка первого конденсатора на второй (передается более 90 % энергии) через искровые промежутки предыонизации. В максимуме напряжения на конденсаторе второго контура ($C_2 = 72$ нФ, состоит из конденсаторов TDK UHV-6A, 2700 pF & 30 kV) пробивается разрядный промежуток и создается активная среда лазера. Компоновка

лазерной камеры и конденсаторов C_2 позволяет достигнуть малой индуктивности в разрядном контуре, обеспечить короткую длительность импульса накачки и большой ток в плазме (до 65 кА). Электроды (1) имеют длину 65 см, расстояние между ними – 2,5 см. Эффективная ширина разряда составляет 7...9 мм. В ХеСl-лазерах использовалась газовая смесь Ne/Xe/HCl = 800/8/1 при полном давлении 3...4 атм. Длина резонатора лазера составляет 100 см, зеркала имеют коэффициенты отражения 0,95 и 0,07.

Полный КПД лазера определяется как отношение энергии лазерного излучения к энергии, запасенной в начальной емкости C_1 . Максимальный КПД ХеСl-лазера равен 2,6 % при $U_0 = 18$ кВ. При повышении зарядного напряжения до 25 кВ эффективность лазера несколько снижается. Физическая эффективность лазера, определяемая по отношению максимумов мощности генерации и накачки, обычно выше и составляет величину (3,5...4) %.

В табл. 1 приведены параметры разработанных лазеров серии EL.

Таблица 1

Name	E, mJ	τ (FWHM),ns	f, Hz	η_1 (полн.), %	η_2 (мощность), %
EL-50-200	200	25	50	2	3,7
EL-10-350	350	28	10	2,2	4
EL-100-500	500	35	100	1,8...2,6	3,8

1.1.7.2. Лазеры с накачкой электронным пучком

Для получения энергии генерации ~ 100 Дж были разработаны лазеры с накачкой электронным пучком. Данные лазеры работают на смеси Ar/Xe/HCl.

100 Дж XeCl-лазер

На рис. 1.1.10 представлена фотография внешнего вида лазера, который состоит из генератора Аркадьего–Маркса (ГИН), вакуумного диода, лазерной камеры, системы откачки и напуска газов, электрического пульта управления. Питание вакуумного диода осуществляется непосредственно от генератора, расположенного в едином корпусе с диодом. Таким образом, в ГИН используется вакуумная изоляция его высоковольтных частей. Такая конструкция позволяет минимизировать индуктивность контура питания вакуумного диода, а также габариты и вес ускорителя. ГИН имеет три параллельно работающих ветви, что позволяет уменьшить его индуктивность и эрозию электродов разрядников. Пространство с искровыми разрядниками каждой ветви заполнено смесью сухого воздуха с SF_6 . Емкость каждой ступени одной ветви равно $0,18$ нФ. Запуск ускорителя осуществляется с помощью управляемого разрядника, в котором заземляется высоковольтный кабель, подающий высокое напряжение на ГИН. Сам разрядник запускается высоковольтным импульсом с тиратронного генератора. Катоды вакуумного диода, имеющие общую длину 110 см, располагаются на специальном держателе, прикрепленном непосредственно к верхней ступени ГИН.



Рис. 1.1.10. Вид лазера с накачкой радиальным электронным пучком

Лазерная камера с внутренним диаметром 25 см располагается между катодами в центре вакуумного диода и выполняет функцию анода. По всей длине камера крепится к корпусу диода с помощью металлической пластины. Пластина улучшает растекание тока и уменьшает потери электронного пучка за счет влияния его собственного магнитного поля. При отсутствии данной пластины и замыкании тока лишь через торцы газовой камеры потери могут достигать 50% . В качестве эмиттера электронов на катодах вакуумного диода используется бархат. Зазор в промежутке анод–катод равен

7 см. В результате в диоде формируются четыре радиально сходящихся электронных пучка, которые инжектируются в лазерную камеру через восемь окон (по два в ряду с общей длиной 120 см). Каждое окно вакуумно-плотно закрыто титановой 40 мкм фольгой, расположенной на металлической решетке. В общем корпусе ГИН и вакуумного диода обеспечивается остаточное давление газа 5×10^{-5} мм рт. ст.

При зарядном напряжении 85 кВ генератор формирует на вакуумном диоде импульс напряжения длительностью 1000 нс с амплитудой до 480 кВ и общим током до 74 кА. Сформированный в диоде электронный пучок обеспечивает достаточно однородное возбуждение лазерной смеси.

Окнами лазерной камеры служат плоскопараллельные пластины из плавленого кварца диаметром 300 мм. В режиме генератора резонатор лазера образовывался внешним зеркалом с Al-напылением и окном лазерной камеры. Лазерная смесь состояла из аргона, ксенона и HCl. На смеси Ar:Xe:HCl = 1000:10:1 при давлении 2 атм и зарядном напряжении 85 кВ энергия излучения в импульсе достигала 120 Дж. Длительность импульса излучения на полувысоте амплитуды составила ~ 250 нс.

200 Дж ХеСl-лазер

Лазер создавался как выходной усилитель в лазерной системе МЭЛС-4к. Возбуждение смеси в нем осуществляется двумя встречными электронными пучками. Внешний вид установки представлен на рис. 1.1.10. Размер активной среды в данном случае составляет $25 \times 25 \times 100$ см³. Для питания 2-х ускорителей электронов используются генераторы импульсного напряжения с вакуумной изоляцией. ГИН и вакуумный диод располагаются в едином металлическом корпусе, внутри которого поддерживается вакуум $2 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. ГИНЫ выполняются по схеме Маркса и состоят из восьми ступеней емкостью 0,6 мкФ. Для уменьшения индуктивности генератора каждая его ступень состоит из трех независимых емкостей, коммутируемых одновременно через газонаполненные разрядники. Взрывозамессионный катод вакуумного диода, изготовленный из бархатной ткани, наклеенной на



Рис. 1.1.11. Вид лазера с энергией излучения 200 Дж, $\lambda = 308$ нм

графитовую подложку, располагается непосредственно на последней ступени генератора.

Отсутствие изолятора между генератором и вакуумным диодом упрощает конструкцию и дополнительно уменьшает индуктивность разрядной цепи генератора, которая была равна 0,3 мкГн. Электронный пучок инжектируется в лазерную камеру через окно размером $25 \times 100 \text{ см}^2$, в котором закреплена опорная решетка с фольгой из титана толщиной 40 мкм. Анодом вакуумного диода служит вторая титановая фольга толщиной 25 мкм, которая одновременно защищает основную фольгу от перегрева низкоэнергетичными электронами пучка, и от воздействия вакуумного пробоя. Лазерная камера изготовлена из нержавеющей стали и имеет внутренний объем 280 л. Расстояние между фольгами, через которые инжектируется электронный пучок, составляет 25 см. Вывод излучения осуществляется через окна диаметром 400 мм, изготовленных из плавленого кварца. Плоскопараллельный резонатор лазера состоит из внешней алюминиевой пластины и окон лазерной камеры, съюстированных между собой. Энергия лазера составляет 200 Дж при длительности импульса $\tau = 250 \text{ нс}$.

На всех выше описанных лазерах проводятся исследования по формированию лазерного пучка с высоким качеством излучения. Данные исследования проводятся в различных оптических схемах как для режимов генератора (неустойчивый резонатор, задающий генератор), так и в режимах усиления. В лазерных системах получены пучки с минимальной расходимостью $\sim 10 \text{ мкрад}$. После формирования излучения лазеры применяются в научных исследованиях для взаимодействия мощных лазерных пучков с различными материалами.

1.2. CO₂-лазеры

1.2.1. Введение

CO₂-лазер занимает особое место среди всего многообразия существующих лазеров. Этот уникальный лазер отличается, прежде всего, тем, что для него характерны и большой энергопотребление, и высокий КПД. В непрерывном режиме получены огромные мощности – в несколько десятков киловатт, импульсная мощность достигла уровня в несколько гигаватт, энергия в импульсе измеряется в килоджоулях. КПД CO₂-лазера (порядка 30 %) превосходит КПД всех лазеров. Частота следования в импульсно-периодическом режиме может составить несколько килогерц. Длины волн излучения CO₂-лазера находятся в диапазоне 9...10 мкм (средний ИК диапазон) и попадают в окно прозрачности атмосферы. Поэтому

излучение CO_2 -лазера удобно для интенсивного воздействия на вещество, например в технологических целях. Кроме того, в диапазон длин излучения CO_2 -лазера попадают резонансные частоты поглощения многих молекул, что делает возможным интенсивное резонансное воздействие лазерного излучения на вещество. При этом следует иметь в виду возможность как дискретной, так и плавной относительно широкодиапазонной перестройки частоты генерации этого лазера, что значительно расширяет его возможности. Добавим к этому, что CO_2 -лазер легко может быть одностотным.

В этом лазере используется специальная смесь газов CO_2 , N_2 и He . Генерация происходит на переходе между двумя колебательными уровнями молекулы CO_2 , а азот и гелий, как мы покажем ниже, значительно повышают КПД лазера. CO_2 -лазер является одним из самых мощных (от газодинамического CO_2 -лазера получены выходные мощности порядка 80 кВт) и одним из наиболее эффективных (КПД = 15...20 %). Лишь полупроводниковые и CO -лазеры имеют более высокие КПД.

1.2.2. Механизмы создания инверсии в CO_2 -лазерах

На рис. 1.2.1 приведены схемы энергетических уровней основных электронных состояний молекул CO_2 и N_2 . Поскольку N_2 – двухатомная молекула, она имеет лишь одну колебательную моду. На рисунке показаны два нижних уровня ($\nu = 0$, $\nu = 1$). Структура энергетических уровней молекулы CO_2 более сложная, поскольку эта молекула является трехатомной. Здесь мы имеем три невырожденных колебательных мод: 1) симметричную валентную моду – ν_1 ; 2) деформационную моду – ν_2 ; 3) асимметричную валентную моду – ν_3 . Поэтому колебания молекулы описываются тремя квантовыми числами n_1 , n_2 и n_3 , которые определяют число квантов в каждой колебательной моде. Таким образом, соответствующий уровень обозначается этими тремя квантовыми числами, записываемыми в последовательности n_1 , n_2 , n_3 . Например, уровень 01^10 соответствует колебанию, деформационная мода (мода 2) которого имеет один колебательный квант. Поскольку из трех типов колебаний моде 2 соответствует наименьшая постоянная упругости (колебания являются поперечными), рассматриваемый уровень имеет наименьшую энергию. Генерация происходит на переходе между уровнями 00^01 и 10^0 ($\lambda \approx 10,6$ мкм), хотя можно получить генерацию также и на переходе между уровнями 00^01 и 02^0 ($\lambda \approx 9,4...9,6$ мкм).

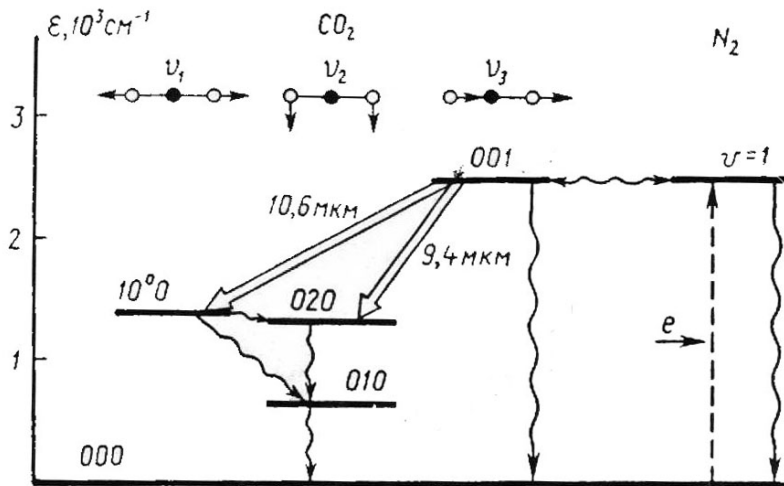


Рис. 1.2.1. Нижние колебательные уровни основного электронного состояния молекул N_2 и CO_2 (для простоты здесь не показаны вращательные уровни)

Накачка на верхний лазерный уровень $00^{\circ}1$ происходит очень эффективно благодаря следующим двум процессам:

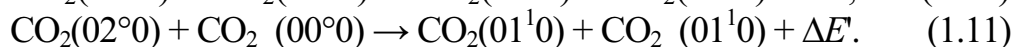
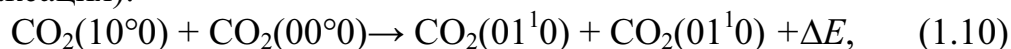
1. Непосредственные столкновения с электронами. Очевидно, основной тип непосредственного столкновения, который следует рассмотреть, имеет вид $e + CO_2(000) \rightarrow e + CO_2(001)$. Сечение столкновения с электроном для данного процесса очень велико и намного превышает соответствующее сечение возбуждения уровней 100 и 020 .

2. Резонансная передача энергии от молекулы N_2 . Этот процесс имеет также большую эффективность благодаря тому, что разница энергий между возбужденными уровнями двух молекул невелика ($\Delta E = 18 \text{ см}^{-1}$). Кроме того, очень эффективным является процесс возбуждения молекулы N_2 из основного состояния на уровень $\nu = 1$ при столкновениях с электронами, причем уровень $\nu = 1$ является метастабильным. Рассмотрим теперь следующий вопрос, а именно релаксацию верхнего и нижнего лазерных уровней. Релаксация указанных уровней в большей мере определяется столкновениями. В соответствии с этим время релаксации верхнего лазерного уровня τ_s можно определить по формуле

$$1/\tau_s = \Sigma a_i p_i, \quad (1.9)$$

где p_i – парциальные давления; a_i – постоянные, характеризующие каждую компоненту газовой смеси в разряде. Так, для полного давления смеси – 15 мм рт. ст. (при парциальных давлениях $CO_2 : N_2 : He$ в отношении 1:1:8) мы находим, что время жизни верхнего лазерного уровня $\tau_s \approx 0,4$ мс. Что касается скорости релаксации нижнего уровня, то за счет околорезонансных процессов столкновения с молекулами CO_2 в основном со-

стоянии уровни $10^{\circ}0$ и $02^{\circ}0$ эффективно взаимодействуют с уровнем 01^10 (VV-релаксация):



Вероятность этих двух процессов очень большая, поскольку ΔE и $\Delta E'$ много меньше kT . Следовательно, населенности трех уровней $10^{\circ}0$, $02^{\circ}0$ и 01^10 достигают теплового равновесия за очень короткое время. Релаксация с уровня 01^10 может происходить только путем передачи этой энергии в энергию поступательного движения сталкивающихся частиц (VT-релаксация). При этом наиболее эффективно этот процесс происходит с более легкими атомами, т. е. гелием. При тех же давлениях время жизни составляет около 20 мкс. То есть это значение времени жизни нижнего лазерного уровня. За счет того, что время жизни верхнего лазерного состояния намного больше, населенность будет накапливаться на верхнем лазерном уровне и условие непрерывной генерации также выполняется. Заметим, что наличие гелия приводит и к другому важному эффекту. За счет высокой теплопроводности гелия поддерживается низкая температура CO_2 , при этом тепло отводится к стенкам газоразрядной трубки. Низкая температура поступательного движения CO_2 необходима для того, чтобы избежать заселения нижнего лазерного уровня за счет теплового возбуждения, поскольку разность энергий между уровнями в действительности сравнима с kT . Таким образом, благоприятное воздействие, которое оказывают на лазер N_2 и He , объясняется тем, что N_2 способствует заселению верхнего лазерного уровня, а He – обеднению нижнего.

Из представленного выше примера ясно, что генерация в CO_2 -лазере может осуществляться на переходе либо $(00^{\circ}1) \rightarrow (10^{\circ}0)$ ($\lambda = 10,6$ мкм), либо $(00^{\circ}1) \rightarrow (02^{\circ}0)$ ($\lambda = 9,6$ мкм). Поскольку сечение первого перехода больше, а верхний уровень один и тот же, генерация, как правило, происходит на переходе $00^{\circ}1 \rightarrow 10^{\circ}0$. Для получения генерации на линии 9,6 мкм в резонатор для подавления генерации на линии с наибольшим усилением помещается соответствующее частотно-селективное устройство. Поскольку каждый колебательный уровень имеет еще вращательные уровни, то в CO_2 -лазере генерация фактически происходит на колебательно-вращательном переходе молекулы.

1.2.3. Конструкции и способы возбуждения CO_2 -лазеров

С точки зрения конструкции и способа возбуждения CO_2 -лазеры можно подразделить на шесть типов: 1) лазеры с медленной продольной прокачкой; 2) лазеры с быстрой продольной прокачкой; 3) отпаянные лазеры; 4) волноводные лазеры; 5) лазеры с поперечной прокачкой; 6) лазеры

ры с поперечным возбуждением при атмосферном давлении (ТЕА-лазеры). Прежде чем рассматривать эти лазеры, следует указать на то, что, хотя они и отличаются друг от друга по многим своим рабочим параметрам (например, выходной мощности), все они имеют общую важную особенность, а именно высокий дифференциальный КПД (15...25 %). Столь высокий КПД является следствием большого квантового выхода (~ 40 %) и очень высокоэффективного процесса накачки, который имеет место в СО₂-лазере при оптимальной электронной температуре разряда.

Лазеры с продольным возбуждением и медленной продольной прокачкой. Впервые генерация в СО₂-лазере была получена в лазере именно такого типа (Ч. Пател, 1964 г.). Газовая смесь медленно прокачивается вдоль лазерной трубки (рис. 1.2.2) просто для того, чтобы удалить продукты диссоциации, в частности СО, которые в противном случае загрязняют лазерную среду. Отвод тепла обеспечивается теплопередачей в радиальном направлении к стенкам трубки (обычно стеклянным), которые охлаждаются извне подходящим теплоносителем (как правило, водой). Часто применяется конструкция с внутренним зеркалом, и, по крайней мере, в конфигурации рис. 1.2.2, один из металлических держателей, который включает в себя зеркало резонатора, должен находиться при высоком напряжении. Одно из главных ограничений этого лазера состоит в том, что независимо от диаметра трубки в нем имеется верхний предел выходной мощности с единицы длины разряда (50...60 Вт/м). Это можно объяснить следующим образом. При данной плотности тока число молекул, накачиваемых на верхний лазерный уровень в единицу времени, можно записать в виде

$$(dN_2/dt)_p \approx (j\sigma_e N_g/e) (v_{\text{медл}}/v_{\text{дред}}), \quad (1.12)$$

где σ_e – соответствующее сечение возбуждения электронным ударом, в которое входит как прямое возбуждение, так и возбуждение посредством передачи энергии; N_g – полная населенность основного состояния СО₂; e – заряд электрона; j – плотность тока. Для скоростей накачки, намного превышающих пороговое значение, выходная мощность P пропорциональна величине $(dN_2/dt)_p$. Поэтому можно записать, что

$$P \sim jN_g V_a \sim jpD^2 l, \quad (1.13)$$

где V_a – объем активной среды, D – ее диаметр, l – ее длина, а p – давление газа. При оптимальных рабочих условиях мы имеем теперь следующее:

1. Для поддержания оптимальной электронной температуры разряда должно быть постоянным произведение pD [$\sim 22,5$ (мм рт. ст.)·см; например, 15мм рт. ст. при $D = 1,5$ см].

2. Из-за ограничений на тепловыделение, связанных с необходимостью отвода тепла к стенкам трубки, существует оптимальное значение плотности тока, причем оно обратно пропорционально диаметру трубки D . То, что оптимальное значение I должно существовать, можно понять, если заметить, что избыточная плотность тока приводит к избыточному нагреву смеси (даже если КПД = 20 %, около 80 % электрической мощности рассеивается в разряде в виде тепла), вследствие чего мы имеем тепловое заселение нижних лазерных уровней. Обратно пропорциональную же зависимость оптимального значения I от D можно объяснить, если принять во внимание то, что чем больше диаметр трубки, тем более затруднена передача выделяющегося тепла к стенкам. Из этих рассуждений мы заключаем, что при оптимальных условиях I и p обратно пропорциональны величине D и, следовательно, в соответствии с выражением (10) оптимальное значение P определяется лишь длиной трубки l . СО₂-лазеры с медленной продольной прокачкой относительно низкой мощности (50...100 Вт) широко используются в лазерной хирургии, для подгонки резисторов, для резки керамических пластин в электронной промышленности и сварки тонких металлических листов (толщиной меньше 1 мм).

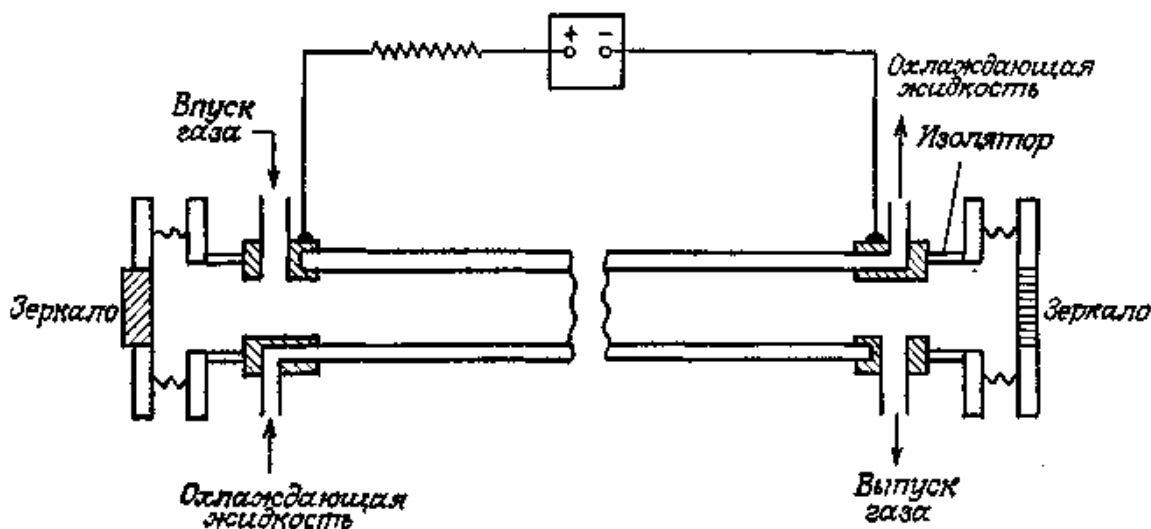
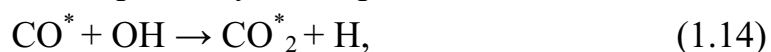


Рис. 1.2.2. Схематическое представление СО₂-лазера с продольным возбуждением и продольной прокачкой газа

Лазеры с продольным возбуждением и быстрой продольной прокачкой. Одним из возможных и практически очень интересных решений, позволяющих преодолеть ограничения на выходную мощность лазеров рассмотренного выше типа, является прокачка газовой смеси вдоль трубки с очень высокой сверхзвуковой скоростью (около 50 м/с). В этом случае теплота уносится просто путем удаления разогретой

смеси, которая, прежде чем вернуться в трубку, охлаждается вне ее пределов в соответствующем теплообменнике. При этом плотность тока не имеет оптимального значения, мощность фактически возрастает линейно с увеличением I , и можно достичь значительно более высокой выходной мощности на единицу длины разряда (~ 1 кВт/м и даже больше). Помимо охлаждения смесь за пределами трубки пропускается через катализатор, чтобы газ СО прореагировал с O_2 (некоторое количество O_2 уже имеется в смеси благодаря диссоциации CO_2 в области разряда). Это обеспечивает необходимую регенерацию молекул CO_2 . В этом режиме необходимая подпитка смеси крайне мала, и можно добиться работы в полностью запаянном режиме. В настоящее время CO_2 -лазеры с быстрой продольной прокачкой высокой мощности (1...3 кВт) нашли широкое применение во многих операциях по обработке материалов и, в частности, для лазерной резки металлов (с толщиной до нескольких миллиметров).

Отпаянные лазеры. Если в устройстве, показанном на рис. 1.2.2 остановить прокачку газовой смеси, то через несколько минут генерация прекратится, поскольку продукты химической реакции (в частности, молекулы СО), образующиеся в разряде, уже не удаляются, а поглощаются стенками трубки или начинают взаимодействовать с электродами, нарушая таким образом равновесие в смеси CO_2 –СО– O_2 . В конечном счете, это привело бы к диссоциации молекул CO_2 . Чтобы обеспечить регенерацию молекул CO_2 из СО, в газоразрядной трубке отпаянного лазера должен находиться определенный катализатор. Для этого в газовую смесь можно просто добавить небольшое количество паров воды (около 1 %). В данном случае регенерация молекул CO_2 осуществляется, по-видимому, благодаря следующей реакции:



в которой участвуют колебательно-возбужденные молекулы СО и CO_2 . Требуемое сравнительно небольшое количество паров воды можно получить, добавляя в разряд газообразный водород и кислород. В действительности оказывается, что в смесь необходимо добавлять только водород, поскольку кислород образуется в процессе диссоциации молекул CO_2 . Другая возможность инициирования реакции релаксации основана на использовании горячего (300 °С) никелевого катода, который выполняет роль катализатора. Применение этих методов привело к созданию отпаянных трубок с долговечностью более 10 000 ч. Выходная мощность отпаянных лазеров с единицы длины составляет около 60 Вт/м, т. е. значение, которое дают и лазеры с продольной прокачкой газа. Маломощные (порядка 1 Вт) отпаянные

лазеры с коротким резонатором, и поэтому работающие в одномодовом режиме, нередко применяются в качестве гетеродинов в экспериментах по оптическому гетеродинированию. Отпаянные CO_2 -лазеры несколько более высокой мощности (порядка 10 Вт) привлекают внимание с точки зрения их использования в лазерной микрохирургии и для механической обработки микрорезанием.

Волноводные лазеры. Если диаметр лазерной трубки на рис. 1.2.2 уменьшить до нескольких миллиметров (2...4 мм), то лазерное излучение в трубке распространяется, как в волноводе. Такие волноводные CO_2 -лазеры имеют низкие дифракционные потери. Было показано, что наилучшие характеристики получаются с трубками, изготовленными из BeO или SiO_2 . Главным преимуществом волноводного CO_2 -лазера является то, что благодаря небольшому диаметру отверстия, давление смеси должно быть высоким (100...200 мм рт. ст.). Возрастание давления приводит к увеличению усиления на единицу длины. Это означает, что можно изготавливать короткие CO_2 -лазеры ($L < 50$ см), не сталкиваясь с трудной задачей уменьшения потерь в резонаторе. Однако мощность, которую можно снять с единицы длины разряда, подвержена тому же ограничению, что и мощность рассмотренного выше лазера с медленной продольной прокачкой (~ 50 Вт/м). Поэтому волноводные CO_2 -лазеры играют особенно важную роль, когда имеется необходимость в коротких компактных CO_2 -лазерах низкой мощности ($P < 30$ Вт) (например, для лазерной микрохирургии). Чтобы полностью реализовать возможности, связанные с компактностью этих лазеров, они работают, как правило, в отпаянном режиме. Конструкция лазера может быть такой, как на рис. 1.2.2, когда ток разряда протекает вдоль лазерной трубки либо такой, как на рис. 1.2.3, когда электрический ток (обычно от высокочастотного источника) течет поперек трубки. При фиксированном значении электрического поля ε (из-за того, что величина ε/p должна быть постоянной) конструкция с поперечной накачкой имеет значительное преимущество перед продольной накачкой, поскольку она допускает намного более низкие (на один–два порядка) напряжения на электродах. Высокочастотное ($\nu \approx 30$ МГц) возбуждение обладает многими преимуществами, среди которых наиболее существенными, возможно, являются следующие:

1. В этой схеме отсутствуют постоянные анод и катод, и поэтому исчезают трудности, связанные с химическими процессами в газе вблизи катода.

2. Благодаря включению последовательно с разрядом простых элементов, не рассеивающих энергии (например, диэлектрической пласти-

ны), обеспечивается устойчивый разряд. В силу этих различных преимуществ, высокочастотные разряды все больше применяются не только в волноводных лазерах, но и в лазерах как с быстрой продольной прокачкой, так и с поперечной прокачкой, к рассмотрению которых мы и перейдем непосредственно. В качестве последнего замечания укажем, что трубку волноводного CO_2 -лазера либо вообще не охлаждают, либо, если необходимо отбирать максимальную мощность, охлаждают воздушной струей.

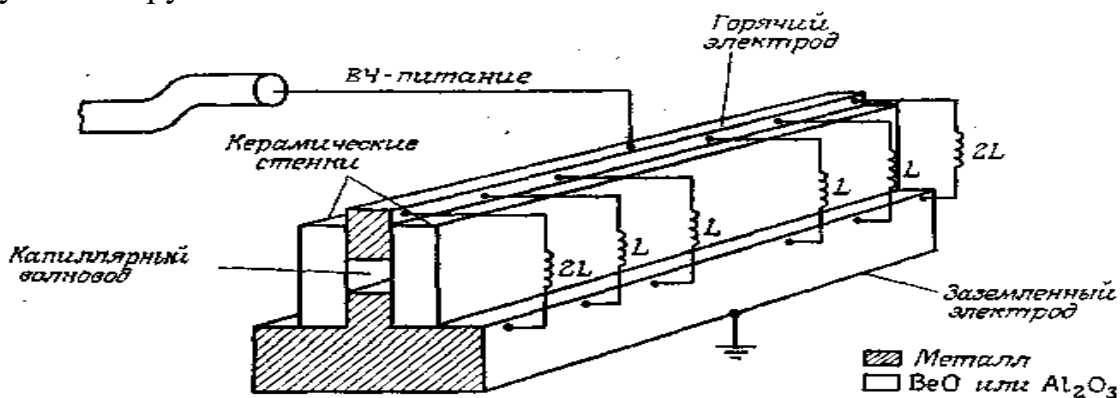


Рис. 1.2.3. Схематическое представление волноводного CO_2 -лазера с накачкой ВЧ-полем

Лазеры с поперечной прокачкой. Другую возможность снять ограничения на мощность в лазере с медленной продольной прокачкой предоставляет прокачка газовой смеси перпендикулярно разряду (рис. 1.2.4).

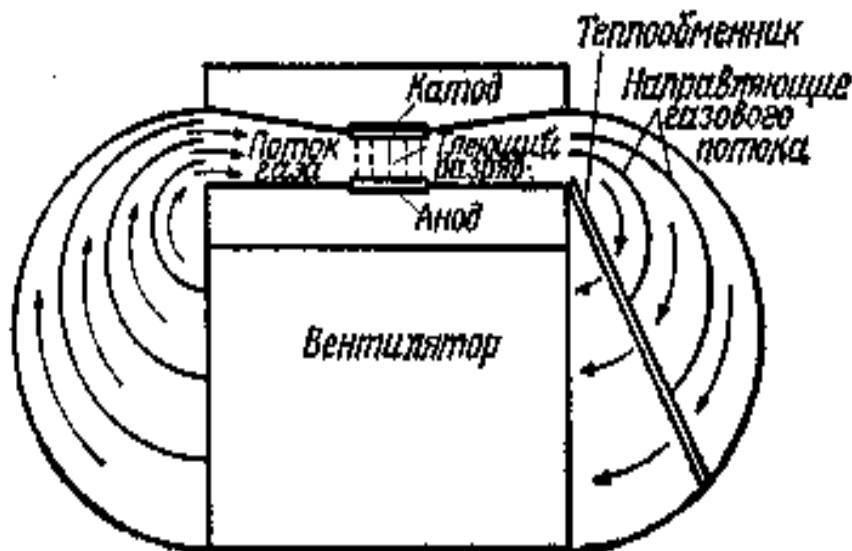


Рис. 1.2.4. Схема устройства CO_2 -лазера с поперечной прокачкой

Если смесь прокачивать достаточно быстро, то, как и в случае лазера с быстрой продольной прокачкой, теплота уносится механически, а не путем переноса к стенкам. Поэтому насыщения выходной мощности при увеличении тока разряда не происходит, и можно достичь высоких выходных мощностей с единицы длины разряда (несколько кВт/м), как и в лазерах с быстрой продольной накачкой. Следует заметить, что в этом случае оптимальное общее давление смеси (порядка 100 мм рт. ст.) теперь примерно на порядок выше, чем давление в системах с продольной прокачкой и большим диаметром трубки. Увеличение общего давления p требует соответствующего увеличения электрического поля ε разряда. Действительно, для реализации оптимальных условий работы необходимо, чтобы во всех случаях отношение ε/p оставалось примерно одинаковым, поскольку это отношение определяет среднюю энергию электронов в разряде. Однако при этом устройство с продольным разрядом типа, показанного на рис. 1.2.2, оказалось бы непрактичным, поскольку оно потребовало бы очень высокого приложенного напряжения (100...500 кВ на длине разряда 1 м). Поэтому делают так, чтобы разряд протекал в направлении, перпендикулярном оси резонатора (эти лазеры называются ТЕ-лазеры, аббревиатура англ. transverse electric field). Одна из наиболее простых реализаций ТЕ-схемы (рис. 1.2.4) показана на рис. 1.2.5. В данной конструкции катод имеет форму металлического стержня, а анод, чтобы достичь однородности разряда, выполнен в виде многих отдельных электродов (сегментный анод).

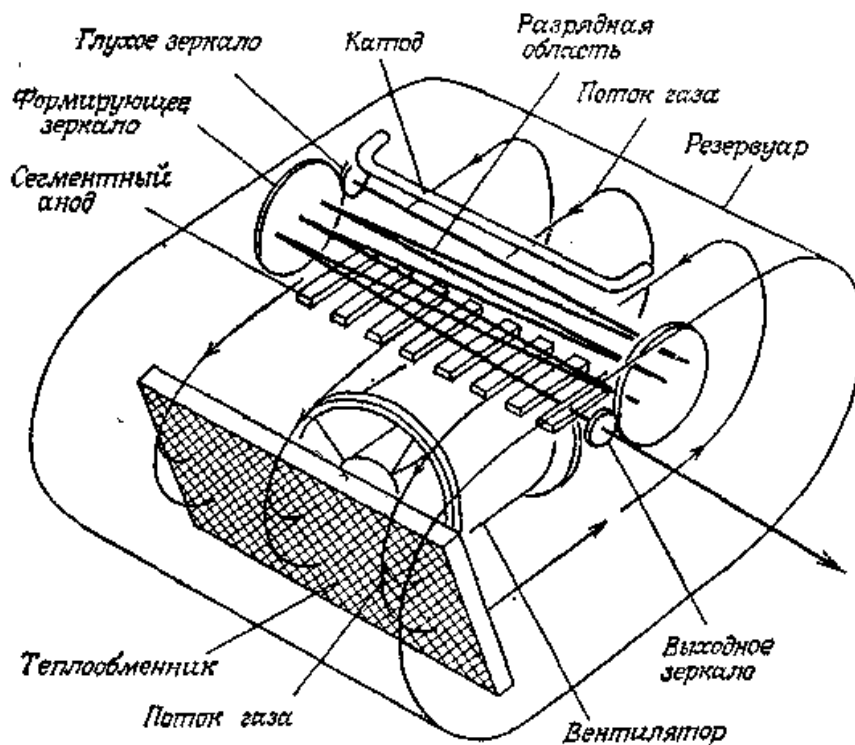


Рис. 1.2.5. Схематическое представление CO_2 -лазера с поперечной прокачкой

ТЕ CO_2 -лазеры с быстрой поперечной прокачкой высокой выходной мощности (1...20 кВт) широко применяются во многих приложениях, связанных с обработкой металла (резание, сварка, поверхностная закалка, поверхностное легирование металлов). По сравнению с лазерами с быстрой продольной прокачкой эти лазеры имеют более простую конструкцию, поскольку для поперечной прокачки не нужна большая скорость прокачки, как в случае с продольной. Однако лазеры с быстрой продольной прокачкой имеют значительно лучшее качество пучка, поскольку у них ток разряда имеет цилиндрическую симметрию, что делает эти лазеры особенно привлекательными для механической обработки резанием.

CO₂-лазеры атмосферного давления с поперечным возбуждением (ТЕА-лазеры). В непрерывных ТЕ CO_2 -лазерах нелегко поднять давление выше ~ 100 мм рт. ст. В тлеющем разряде выше этого давления и при обычно используемых плотностях тока возникают неустойчивости, которые приводят к образованию дуги в объеме разряда. Для преодоления этого осложнения к электродам, между которыми происходит поперечный разряд, прикладывают импульсное напряжение. Если длительность импульса достаточно мала (доля микросекунды), то неустойчивости в разряде не успеют развиться и, следовательно, рабочее давление газа можно повысить вплоть до атмосферного и выше. Эти лазеры называются ТЕА-лазерами (аббревиатура англ. слов transversely excited at atmospheric pressure). Таким образом, ТЕА-лазеры работают в импульсном режиме и позволяют получать большой энергосъем с единицы объема разряда (10...50 Дж/л). Для предотвращения дугового разряда используется также тот или иной тип предыонизации, которая предшествует возбуждающему импульсу напряжения. На рис. 1.2.6 приведена схема, которая часто применяется на практике. В ней предыонизация обеспечивается сильным ультрафиолетовым (УФ) излучением нескольких искр, которые зажигаются вблизи разрядной области. Излучение этих искр в коротковолновой УФ-области приводит к созданию электронов в разрядном промежутке посредством как фотоионизации составляющих газовой смеси, так и благодаря индуцированной УФ-излучением эмиссии электронов из электродов (*УФ-предыонизация*).

К другим методам предыонизации относятся импульсные источники электронного пучка (*предыонизация электронным пучком*) и ионизация, благодаря коронному разряду (*коронная предыонизация*). Как только произошла ионизация во всем объеме лазерного разряда, включается быстродействующий коммутатор (водородный тиратрон или газовый разрядник) и к разрядным электродам прикладывается главный разрядный импульс. При низкой частоте повторения импульсов (порядка 1 Гц)

нет необходимости в прокачке газовой смеси. При более высоких повторениях импульсов газовая смесь прокачивается в перпендикулярном оси резонатора направлении и охлаждается в соответствующем теплообменнике. Максимальная энергия, вкладываемая в единицу объема разряда, ограничивается допустимым перегревом рабочей смеси и составляет $3 \dots 5 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{Па})$. Для повышения средней мощности излучения используется быстрая поперечная прокачка рабочей смеси. Частота следования импульсов (максимальная)

$$f_{\max} = \frac{v_o}{d_o}, \quad (1.15)$$

где v_o – скорость потока смеси; d_o – поперечные размеры разряда.

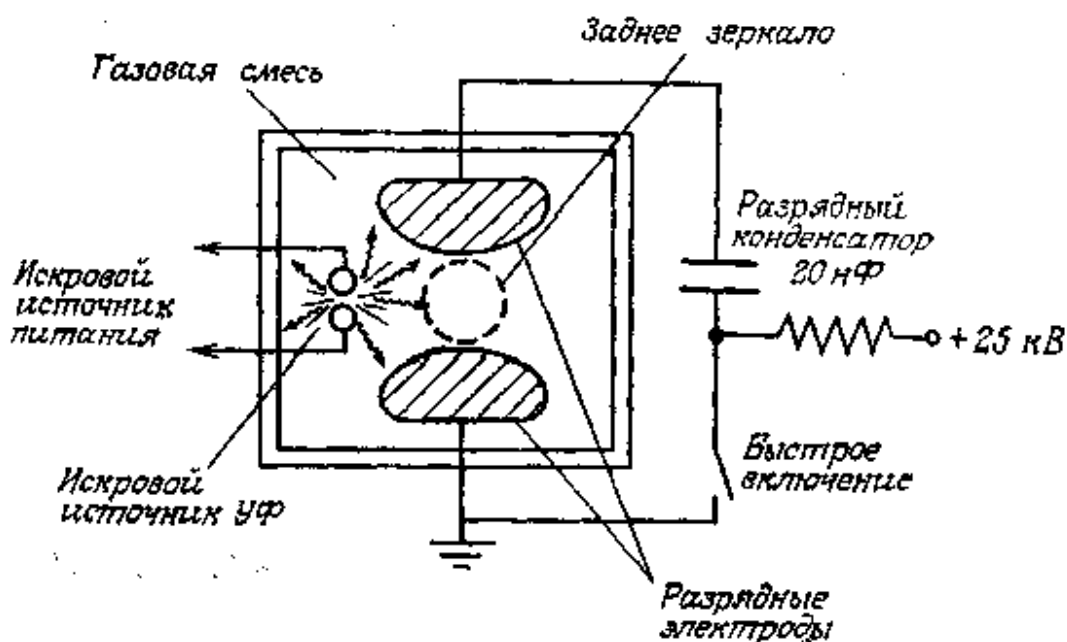


Рис. 1.2.6. Схематическое представление (вид вдоль лазерной оси) лазера, накачиваемого поперечным разрядом с использованием УФ-излучения для предыонизации газа

При $f = 100 \dots 1000 \text{ Гц}$ и $d_o = 1 \dots 5 \text{ см}$, $v_o \approx 10 \dots 100 \text{ м/с}$. Другой интересной характеристикой этих лазеров являются их относительно широкие полосы генерации ($\sim 4 \text{ ГГц}$ при $p = 1 \text{ атм}$ благодаря столкновительному уширению). Таким образом, в ТЕА-лазерах в режиме синхронизации мод были получены оптические импульсы длительностью менее 1 нс . Помимо широкого использования ТЕА CO_2 -лазеров в научных приложениях, они находят многочисленные применения в промышленности для обработки материалов в тех случаях, когда импульсный характер пучка дает некоторое преимущество (например, импульсная лазерная маркировка).

CO₂-лазеры работают на смеси CO₂ + N₂ + He в пропорциях $\left\{ \begin{matrix} 1:1:3 \\ 1:1:6 \end{matrix} \right\}$.

Накачка осуществляется самостоятельным или несамостоятельным электрическим разрядом. При самостоятельном разряде рабочая концентрация электронов создается самим разрядом. При несамостоятельном разряде рабочая концентрация электронов обеспечивается внешним источником (высокочастотное ионизирующее поле или электронный пучок), а электрическое поле обеспечивает необходимую для возбуждения молекул энергию электронов.

1.2.4. Схемы питания газового лазера с продольным разрядом

На рис. 1.2.7 приведена простейшая схема питания непрерывного электроразрядного газового лазера. Схема не содержит импульса поджига, т. е. это схема с самостоятельным продольным разрядом, который инициируется самопробоем. Схема работает следующим образом: напряжение сети 220 В (50 Гц) подается (обычно через контакты реле) на первичную обмотку повышающего трансформатора T_p ; выпрямитель D с фильтром C и балластным сопротивлением R_H обеспечивает постоянный ток разряда, который прекращается после отключения питания.

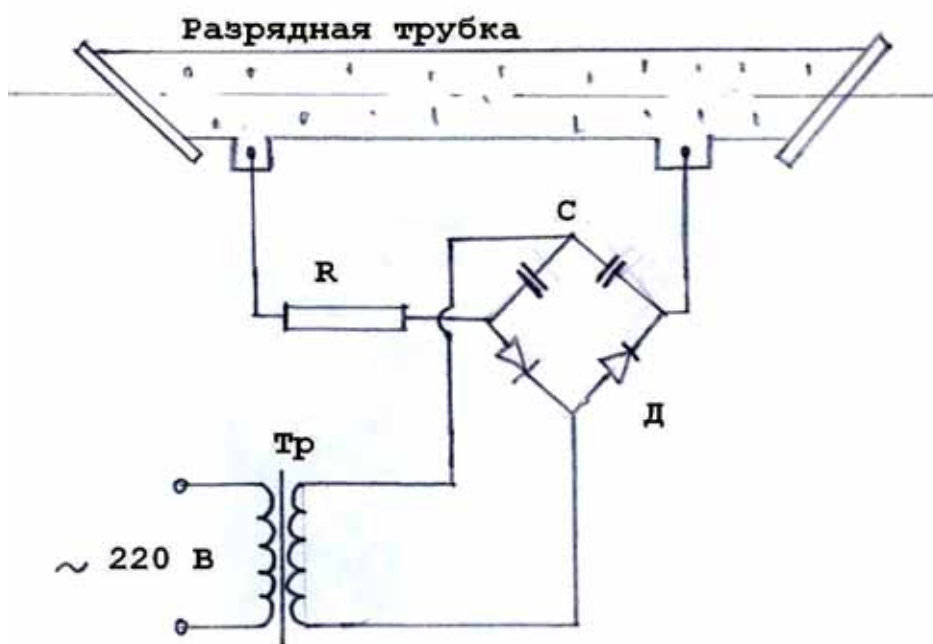


Рис. 1.2.7. Схема питания ГРТ (непрерывный разряд)

Недостатком схемы является потеря мощности на балластном сопротивлении (до 50 %). Это очень важно для мощных лазеров и не имеет значения для маломощных.

1.3. Твердотельные лазеры

1.3.1. Введение

Технологические твердотельные лазеры широко применяются в лазерной, термической обработке материалов. Активной средой таких лазеров в основном является алюмоиттриевый гранат, длина волны излучения 1,06 мкм. Однако первым твердотельным лазером являлся лазер на кристаллах рубина. В курсе лекции будут обсуждаться оба типа лазеров. Рубиновый лазер работает только в импульсном режиме, в то время как лазеры на алюмоиттриевом гранате (YAG-лазеры) могут работать как в импульсном, так и в непрерывном режиме. Возбуждение твердотельных лазеров осуществляется оптическим излучением. Твердотельные лазеры обладают высоким уровнем мощности излучения (200...1000 Ватт) и небольшими габаритами излучателя, что обусловлено большим удельным энергопотреблением излучения с активной среды лазера. К достоинствам твердотельных лазеров можно отнести следующее:

- высокая эксплуатационная надежность и простота в обращении;
- дешевая и доступная элементная база (стекло, кварц и др.);
- прозрачность для луча юстировочного He-Ne – лазера («пилотного луча»);
- высокое начальное поглощение при обработке металла по сравнению с пучком CO₂-лазера;
- простота в транспортировке и фокусировке пучка, в управлении мощностью (энергией), возможность транспортировки через оптическое волокно и др.

К недостаткам можно отнести:

- многомодовый режим излучения;
- низкий КПД генерации (1...3 %);
- высокие требования к системе охлаждения;

1.3.2. Механизм генерации твердотельных лазеров

Первым твердотельным лазером был лазер на рубине, созданный в 1960 г. Рубин представляет собой соединение Al₂O₃ с вкраплением ионов Cr³⁺. Такой лазер работает по трехуровневой схеме (представлена на рис 1.3.1), в которой уровнем 1 является основное состояние ⁴A₂, уровнем 2 – полосы ⁴F₂ и ⁴F₁, уровнем 3 – дублет ²E. Время безызлучательной передачи энергии из полос ⁴F₂ и ⁴F₁ в дублет ²E составляет 100 нс, между подуровнями дублета E и 2A происходит быстрый (за 100 нс) релаксационный обмен энергией.

При импульсе накачки длиннее 100 нс между подуровнями уровня 3 успевает установиться тепловое равновесие. Поэтому обычно генерация наблюдается на линии R_1 (соответствующий подуровень сильнее населен, и матричный элемент перехода $E \rightarrow {}^4A_3$ несколько больше). При комнатной температуре ширина линии усиления составляет около 11 см^{-1} .

В полосах накачки U - и Y -поглощение составляет $2 \dots 3 \text{ см}^{-1}$. Это означает, что диаметр рубиновых стержней или толщина рубиновых пластин при двустороннем освещении излучением накачки не должны превышать $2 \dots 2,5 \text{ см}$. В противном случае излучение накачки не сможет достаточно эффективно проникнуть внутрь объема рабочего кристалла, активная среда окажется сильно неоднородной в поперечном сечении, что приведет к ухудшению параметров лазерного излучения. В рубиновых лазерах коэффициент линейного усиления достигает значения $0,2 \dots 0,25 \text{ см}^{-1}$.

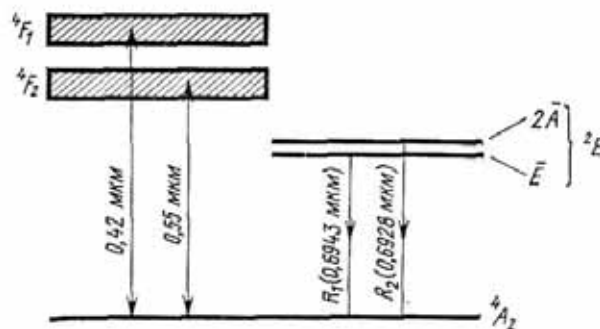


Рис. 1.3.1. Уровни энергии рубина

Накачка обычно осуществляется излучением мощных импульсных ламп-вспышек. Наиболее экономичны ксеноновые лампы, их КПД достигает 50 %. По существу, в рубиновом лазере происходит преобразование световой энергии высокотемпературного источника излучения сплошного спектра в монохроматическое излучение. Это обстоятельство имеет большое принципиальное значение.

В мощных рубиновых лазерах применяются круглые стержни диаметром $2 \dots 3 \text{ см}$ и длиной $20 \dots 30 \text{ см}$. В обычных условиях роста ось c кристалла составляет угол $90 \dots 60^\circ$ с осью стержня. Излучение такого кристалла линейно поляризовано. Вектор поля E излучения перпендикулярен плоскости, проходящей через ось c и ось стержня. Выращивание кристаллов нулевой ориентации, т. е. с осью c , параллельной оси кристалла, возможно, но технологически представляет большие трудности. Излучение нулевых кристаллов не поляризовано.

Основным же недостатком рубинового лазера является трехуровневый механизм его работы. Этот недостаток является принципиальным, обусловленным схемой уровней трехвалентного иона хрома.

Ионы группы редких земель обладают также интенсивными полосами поглощения на переходах $4f \rightarrow 5d$, удобными для накачки активных сред. Многие трехвалентные ионы (Er, Ho, Pr, Tm, Nd и др.) могут работать в ближнем ИК и видимых диапазонах.

Наибольшее значение имеет ион Nd^{3+} . Трехвалентный ион неодима легко активирует многие матрицы. Из них самыми перспективными оказались кристаллы иттрий-алюминиевого граната $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (YAG) и стекла. Накачка переводит ионы Nd^{3+} из основного состояния $^4I_{9/2}$ в несколько относительно узких полос, играющих роль верхнего уровня. Эти полосы образованы рядом перекрывающихся возбужденных состояний, их положения и ширины несколько меняются от матрицы к матрице. Из полос накачки осуществляется быстрая передача энергии возбуждения на метастабильный уровень $^4F_{3/2}$ (рис. 1.3.2). Время жизни этого уровня составляет 0,2 мс в YAG и 0,7 мс в стекле. Наибольшей вероятностью обладает лазерный переход $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ ($\lambda = 1,06$ мкм). Энергетическая щель между состояниями $^4I_{11/2}$ и $^4I_{9/2}$, равная примерно 2000 см^{-1} , обеспечивает четырехуровневый характер генерации неодимового лазера.

Чем ближе к уровню $^4F_{3/2}$ расположены полосы поглощения, тем выше КПД генерации. Достоинством кристаллов YAG является наличие интенсивной красной линии поглощения.

В стеклах из-за неоднородности локальных электростатических полей ближайшего окружения линия люминесценции 1,06 мкм неоднородно сильно уширена ($\Delta\lambda \approx 30$ нм). В кристаллах YAG однородное уширение составляет примерно 0,7 нм.

Сильное неоднородное уширение приводит к тому, что неодимовое стекло имеет меньшее усиление, а соответствующие лазеры более богаты модовой структурой, чем гранат, активированный неодимом. Вместе с тем, стекло допускает большее (до 6 %) введение активных центров. Кристаллы YAG активируются до концентрации 1,5 % в стехиометрическом замещении иона Y^{3+} на Nd^{3+} .

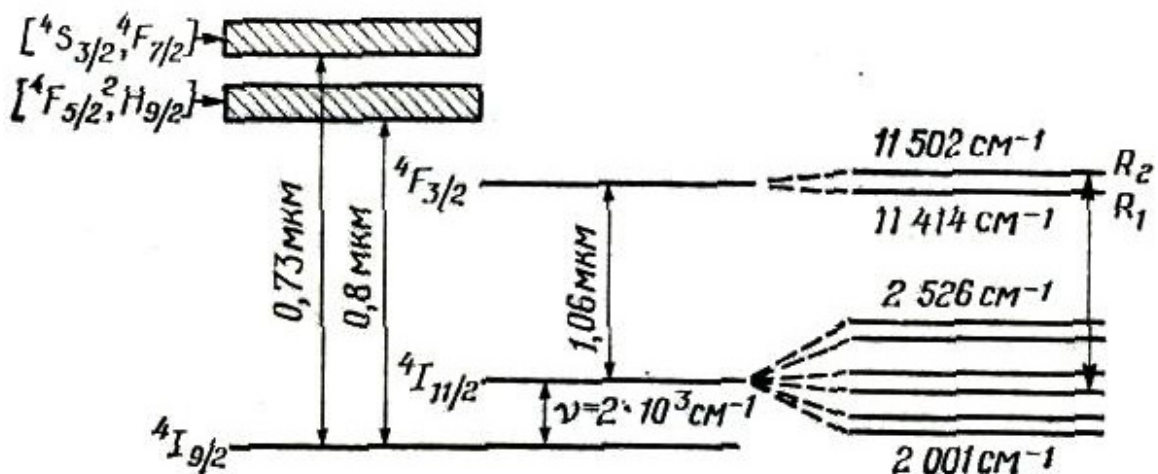


Рис. 1.3.2. Диаграмма энергетических уровней неодима

Обычно области применения неодимовых лазеров на гранате и стекле существенно различаются. В силу большей теплопроводности и однородности гранатовые лазеры легко работают в непрерывном и импульсно-периодическом режимах, в которых достигнуты средние мощности излучения в сотни ватт. Неодимовое стекло, в силу больших объемов и более высокой концентрации активатора, хорошо накапливает энергию. Поэтому именно стекло служит активной средой импульсных лазеров высокой энергии. Достигнуты значения импульсной энергии в десятки килоджоулей.

1.3.3. Типы твердотельных лазеров

Nd:YAG-лазеры с ламповой накачкой. На рис. 1.3.3 приведена схема накачки лазера от газоразрядной лампы.

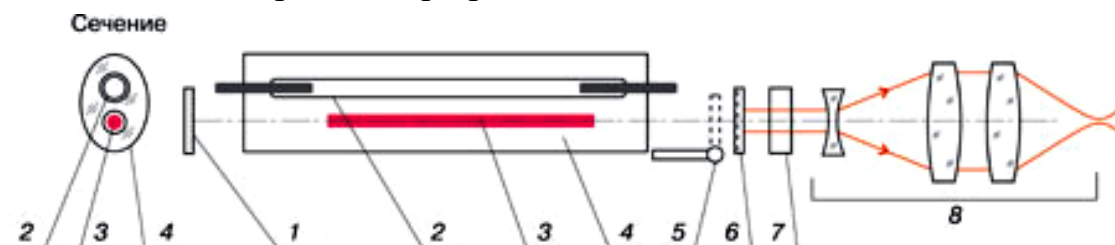


Рис. 1.3.3. Вариант исполнения Nd:YAG-лазера с ламповой накачкой:

1 – заднее зеркало; 2 – лампа накачки; 3 – кристалл Nd:YAG;

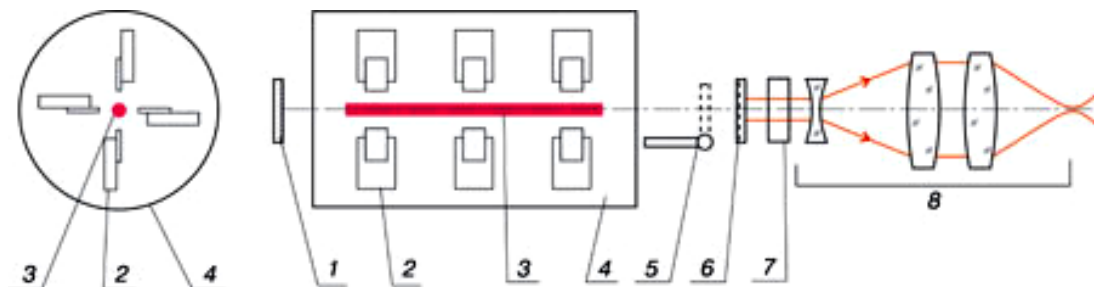
4 – отражатель; 5 – заслонка; 6 – выходное зеркало; 7 – модулятор света;

8 – фокусирующая оптическая система

«Ламповым» лазерам присущ ряд недостатков, вынуждающих в некоторых случаях искать им замену: невысокий коэффициент полезного действия, большое энергопотребление, необходимость во внешнем водяном охлаждении и в периодической замене ламп накачки.

Твердотельные лазеры с диодной накачкой. Развитие и совершенствование лазерной техники в 90-е гг. привели к распространению твердотельных лазеров, включая и Nd:YAG-лазеры, где ламповый источник света (оптическая накачка) заменен полупроводниковыми лазерами (диодами).

Это лазеры с полупроводниковой накачкой, один из вариантов оптической схемы которых представлен на рис. 1.3.4. Главное отличие этих лазеров от «ламповых» заключается в более высокой (на порядок!) эффективности преобразования излучения мощных лазерных диодов, что позволяет избежать высокого электропотребления, интенсивного внешнего водяного охлаждения (обычно внутренний контур водяного охлаждения активного тела лазера все же необходим).



*Рис. 1.3.4. Вариант исполнения Nd:YAG-лазера с полупроводниковой накачкой:
 1 – заднее зеркало; 2 – лазерные диоды оптической накачки;
 3 – кристалл Nd:YAG; 4 – корпус; 5 – заслонка; 6 – выходное зеркало;
 7 – модулятор света; 8 – фокусирующая оптическая система*

На рис. 1.3.5 приведена фотография одной модели твердотельного лазера с диодной накачкой, работающего в зеленой области спектра (Nd:YAG+KTP DPSSLs). Для накачки твердотельных лазеров выпускаются различные модификации лазерных диодов. На рис. 1.3.6 показан внешний вид лазерных диодов (InAlGaAs), имеющие мощность от 100 мВт до 100 Вт. Диоды отличаются высокой стабильностью излучения и низким уровнем оптического шума.



Рис. 1.3.5. Внешний вид твердотельного лазера с диодной накачкой



Рис. 1.3.6. Лазерные диоды InAlGaAs

Волоконные лазеры

Из лазеров с полупроводниковой накачкой, в свою очередь, наиболее популярными становятся волоконные лазеры (Fiber Laser или Faser). Эти источники были разработаны для телекоммуникационных систем волоконной связи, где они применяются в качестве усилителей сигналов. Сегодня эти устройства достигли высокой мощности, надежности, позволяющих с успехом использовать их для решения различных задач лазерной обработки материалов. Очень часто волоконные лазеры заменяют в приложениях лазеры других типов, например, твердотельные Nd:YAG-лазеры. Они представляют собой практически идеальные преобразователи световой энергии лазерных диодов накачки в лазерное излучение с рекордным КПД

(10...25 %), по сравнению, например, с Nd:YAG-лазерами. Различные волоконные лазеры излучают в области 920...2200 нм с диапазоном выходной мощности от 10 мВт до 10 кВт (иттербиевые) и шириной линии излучения от 100 ГГц до 10 кГц, в том числе перестраиваемые в широком спектральном диапазоне. Создание таких лазеров явилось результатом многолетнего развития лазерной техники.

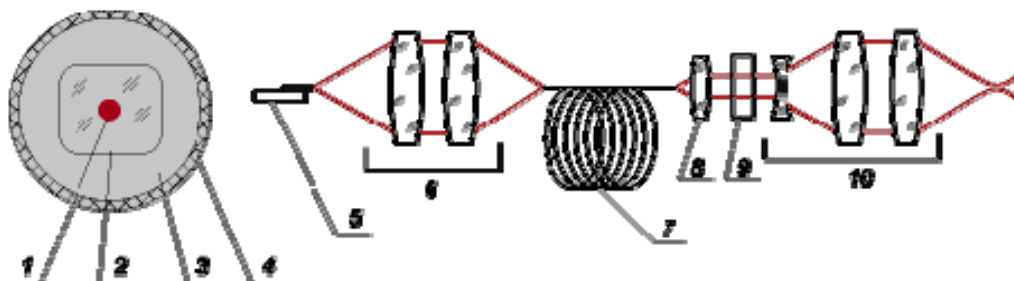


Рис. 1.3.7. Оптическая система с волоконным лазером:

- 1 – сердцевина, легированная металлом, диаметр 6...8 мкм;*
- 2 – кварцевое волокно, диаметр 400...600 мкм; 3 – полимерная оболочка;*
- 4 – внешнее защитное покрытие; 5 – лазерные диоды оптической накачки;*
- 6 – оптическая система накачки; 7 – волокно (до 40 м); 8 – коллиматор;*
- 9 – модулятор света; 10 – фокусирующая оптическая система*

Сначала остановимся немного на технических особенностях самих волоконных лазеров с полупроводниковой накачкой. На рис. 1.3.7 представлена схема работы волоконного лазера с полупроводниковой накачкой и в общем виде весь оптический тракт вплоть до обрабатываемого материала.

Главная особенность этого лазера в том, что излучение здесь рождается в тонком, диаметром всего в 6...10 мкм, волокне (например, активная среда иттербия), которое фактически находится внутри кварцевого волокна диаметром 400...600 мкм. Излучение лазерных диодов накачки вводится в кварцевое волокно и распространяется вдоль всего сложного составного волокна, имеющего длину несколько десятков метров. Упрощенно говоря, это излучение «пересекает», то есть оптически накачивает сердцевину. Именно в ней на атомах иттербия (Yb) происходят те замечательные физические превращения, приводящие к возникновению лазерного излучения. Вблизи концов волокна на сердцевине делают два так называемых дифракционных зеркала в виде набора «насечек» на цилиндрической поверхности сердцевины (дифракционные решетки). Таким образом создается резонатор волоконного лазера. Общую длину волокна и количество лазерных диодов выбирают, исходя из требуемой мощности, эффективности. На выходе получается идеальный одномодовый лазерный пучок с весьма равномерным распределением мощности, что позволяет сфокусировать излучение в пятно малого размера и иметь большую, чем в случае мощных твердотельных

Nd:YAG-лазеров, глубину резкости, а это чрезвычайно важное для лазерных систем свойство, особенно для многолучевых оптических систем. Также стоит отметить, что ряд свойств излучения волоконных лазеров, например характер поляризации пучка, делает более удобным и надежным управление этим излучением с помощью акусто-оптических компонентов, позволяет реализовать многолучевые схемы записи изображений. В целом повышается надежность всего оптического тракта лазерной системы. Поскольку оптическая накачка идет по всей длине волокна, отсутствуют, например, такие свойственные обычным твердотельным лазерам эффекты, как термолинза в кристалле, искажения волнового фронта вследствие дефектов самого кристалла, девиация луча со временем и др. Эти эффекты всегда были препятствием для достижения максимальных возможностей твердотельных систем. В волоконном же лазере сам принцип его устройства и работы гарантирует высокие «отчетные характеристики» и делает такие лазеры совершенными, практически идеальными преобразователями светового излучения в лазерное.

1.3.4. Активные элементы твердотельных лазеров

В твердотельных лазерах, требуемая в течение нескольких тысяч часов работы мощность генерации в непрерывном или импульсно-периодическом режиме, составляет от десятков Вт до десятков кВт с отклонением оси излучения $< 3 \dots 5'$. Поэтому на материалы активных элементов накладываются следующие требования:

- оптическая однородность;
- высокая теплопроводность;
- высокая оптическая прочность (и фотохимическая стойкость);
- слабое поглощение на рабочей длине волны;
- возможность получения больших размеров;
- низкая стоимость.

Для активных элементов твердотельных лазеров распространены следующие материалы.

Неодимовое стекло (стекло + Nd^{3+} , $\lambda = 1,06$ мкм) бывает двух типов – силикатное и фосфатное. Силикатные – марки ГЛС1...ГЛС14, фосфатные – ГЛС21...ГЛС26.

Концентрация ионов неодима для стекол различных марок колеблется в пределах $(1 \dots 6) \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ (от ~ 1 до 6 %). Стекла должны быть однородны, без свилей и пузырей. Изготавливаются в виде стержней размерами от 5×50 мм до 50×1000 мм. Торцы стержней обрабатываются параллельно друг другу с точностью до $30''$ под прямым углом, углом 85° и углом Брюстера (рис. 1.3.8).

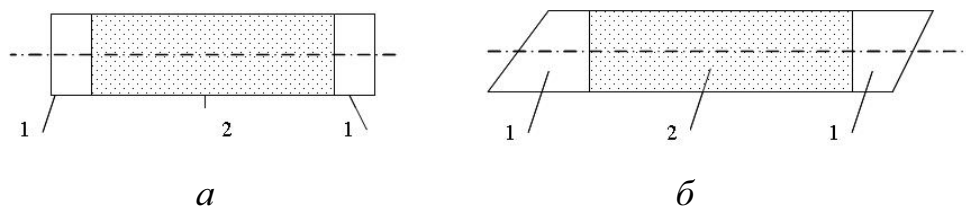


Рис. 1.3.8. Конфигурации неодимовых стекол:
a – стержень с прямыми торцами; *б* – скошенными под углом Брюстера:
 1 – наконечник; 2 – рабочая часть

Время жизни метастабильного состояния 250...500 мкс. Ширина спектра генерации при 300 К 44...88 см⁻¹.

Показатель преломления стекол различных марок на $\lambda = 1,06$ мкм колеблется в пределах 1,52...1,58. Оптический порог поверхностного разрушения силикатного стекла ~ 7 ГВт·см⁻² на $\lambda = 1,06$ мкм и $\tau_u \sim 50$ нс. Оптическая прочность сильно зависит от степени обработки и чистоты поверхности. Порог объемного разрушения выше поверхностного. Теплопроводность λ_m стекла ГЛС1 порядка $\lambda_m \sim 1$ Вт·м⁻¹·К⁻¹ при T = 293 К. У остальных стекол λ_T несколько ниже. Теплоемкость C_p для ГЛС1 составляет при T = 293 К $C_p = 693$ Дж·кг⁻¹·К⁻¹, коэффициент линейного расширения $\alpha = 88 \cdot 10^{-7}$ К⁻¹; плотность $\rho = 2,66 \cdot 10^3$ кг·м⁻³, а температуропроводность

$$\chi = \frac{\lambda_T}{C_p \rho} = \frac{1 [\text{м}^{-1} \text{К}^{-1}]}{693 [\text{Дж} \times \text{кг}^{-1} \text{К}^{-1}] \cdot 2,66 \cdot 10^3 [\text{кг} \times \text{м}^{-3}]} = \frac{10^{-3}}{1843} \cdot \frac{\text{м}^2}{\text{с}} = 5,4 \cdot 10^{-7} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$$

Малые значения теплопроводности не позволяют использовать неодимовые стекла в непрерывных лазерах. Как правило, они используются в импульсных (одиночных) лазерах. Плоский резонатор требует очень точной юстировки для активных элементов из неодимового стекла.

Рубин (Al₂O₃ + Cr³⁺, $\lambda = 0,693$ мкм). По сравнению со стеклом очень неоднороден. Частично поляризует излучение. Юстировка плоского резонатора обеспечивается с точностью до 1'. Фотохимически устойчив. Используется в импульсных лазерах. Трехуровневая система. Чувствителен к перегреву. Обладает высоким порогом накачки. Можно получить высокую плотность мощности.

Технические данные:•

- ширина спектра генерации 21 см⁻¹;
- показатель преломления 1,76;
- концентрация хрома 0,03...0,5 %;
- плотность 3,9·10³ кг·м⁻³;
- теплоемкость C_p ~760 Дж·кг·К⁻¹;
- теплопроводность λ_m 45 Вт·м⁻¹·К⁻¹;

- порог оптического (поверхностного) разрушения H_0 80 Дж/см²
 - при $\tau_n \sim 2 \cdot 10^{-8}$ с для $\lambda = 0,694$ мкм.
- В технологических лазерах используются редко.

Алюмоиттриевый гранат ($Y_3Al_5O_{12} + Nd^{3+}$ или YAG + Nd^{3+} , $\lambda = 1,064$ мкм).

Благодаря отличным термическим, оптическим, термооптическим и механическим характеристикам, $Y_3Al_5O_{12} + Nd^{3+}$ широко используется в технологических лазерах. Низкий порог возбуждения и высокая теплопроводность позволяют работать в непрерывном режиме, а высокая оптическая прочность успешно и в импульсном. АИГ имеет малый температурный коэффициент линейного расширения, высокую твердость и механическую прочность, не растворим в воде.

Основные характеристики:

- ширина спектральной линии генерации 6,5 см⁻¹;
- показатель преломления ($\lambda = 1,06$ мкм) 1,816;
- концентрация ионов Nd^{3+} $0,5 \cdot 10^{20}$ см⁻³ (~ 0,5 %);
- плотность $4,55 \cdot 10^3$ кг·м⁻³;
- теплоемкость C_p ~ 526 Дж·кг·К⁻¹;
- теплопроводность λ_m 11,9 Вт·м⁻¹·К⁻¹;
- время жизни метастабильного состояния ~ 250 мкс.

Из-за высокого показателя преломления Френельское отражение на торцах достаточно велико (~ 8 %). Поэтому торцы нужно просветлять на $\lambda = 1,06$ мкм. Обработка под углом Брюстера на практике не применяется. Выращивание стержней – дело трудоемкое и дорогостоящее, поэтому распространен стандарт размером 6,3×100 мм. Созданы опытные образцы диаметром до 60 мм и длиной до 750 мм. За рубежом стоимость АИГ-стержня составляет на единицу длины около 400 \$/см, поэтому стержни, длиной более 25 см стоят за 10 000 \$. Неодимовое стекло на порядок дешевле. Рубин – нечто среднее. АИГ – изотропен. В непрерывном режиме снимается до 100 Вт/см³.

Алюминат иттрия ($YAlO_3$), $\lambda = 1,06$ мкм.

По характеристикам близок к АИГ. Обладает анизотропией. Выступает как заменитель АИГ. Показатель преломления $n = 1,96$.

Кроме этого используются такие материалы, как

- иттербий ($\lambda = 1 \dots 1,12$ мкм);
- эрбий ($\lambda = 0,9 \dots 2$ мкм);
- туллий ($\lambda = 1,8 \dots 2,2$ мкм).

Данные материалы используются в волоконных лазерах.

В будущем могут быть перспективными следующие материалы:

- КНГГ – кальций-ниобий-галлиевый гранат ($\lambda = 1,016$ мкм, $\lambda_{\tau} = 4,7$ Вт/(м·К));
- ГСГГ:Gr, Nd – гадолиний-скандий-галлиевый гранат.

КНГГ и ГСГГ по характеристикам также близки к АИГ. Оптическая прочность АИГ достаточно высока. Порог объёмного разрушения при воздействии импульса наносекундного диапазона при $\lambda = 1,06$ мкм составляет $2 \cdot 10^{11}$ Вт/см². Материал оптически неоднородный и к юстировке резонатора не критичен.

1.3.5. Элементная база активных элементов

Лампы накачки

В лазерах, работающих в импульсном режиме, используются кварцевые газоразрядные лампы, заполненные ксеноном. Потери энергии на нагревание электродов и колбы, а также на поглощение излучения в колбе ($\lambda < 180$ нм и $\lambda > 3500$ нм) не превышают 25 % энергии разряда. Импульсные лампы бывают следующих конструкций: спиральная, коаксиальная, прямолинейная, трубчатая, П-образная. Наибольшее распространение в твердотельных лазерах получили прямолинейные трубчатые лампы. Внутренний диаметр трубок от 2 до 30 мм. Длина разрядного промежутка может быть любая, но должна соответствовать длине активных элементов. Спектральный состав излучения ксеноновой лампы изменяется в зависимости от давления и величины разрядного тока (рис. 1.3.9). Оптимальное давление ксенона составляет 300...800 мм рт. ст. Хотя КПД ламп высок, из общей энергии, излучаемой лампой, только 25 % имеет спектральный состав, соответствующий полосам поглощения активных элементов (рис.1.3.10). Это при оптимальной мощностной нагрузке лампы, которая для неодимовых активных элементов не должна превышать $10^3 \dots 10^4$ Вт/см² светового потока с поверхности колбы лампы. Для рубина этот показатель может быть выше. В твердотельных лазерах используются лампы типа ИСП, ИФП или ИНП. Так, для лампы ИФП-800 (максимальная нагрузка 800 Дж, площадь поверхности излучения ~ 20 см²) при $\tau_n \sim 10^{-3}$ с для получения оптимальной светимости поверхности $\sim 10^3$ Вт/см² энергия составляет $\sim 200 \dots 300$ Дж, что в 3...4 раза ниже максимальной загрузки. При этом значительно увеличивается срок службы лампы.

Для накачки активных элементов лазеров непрерывного действия применяются дуговые лампы постоянного горения. В этих лампах используется криптон (Kr) высокого давления (1...8 атм), поскольку при малых плотностях разрядного тока их спектр излучения лучше согласо-

ется с полосами поглощения активных элементов, чем у ксеноновых ламп (рис. 1.3.11).

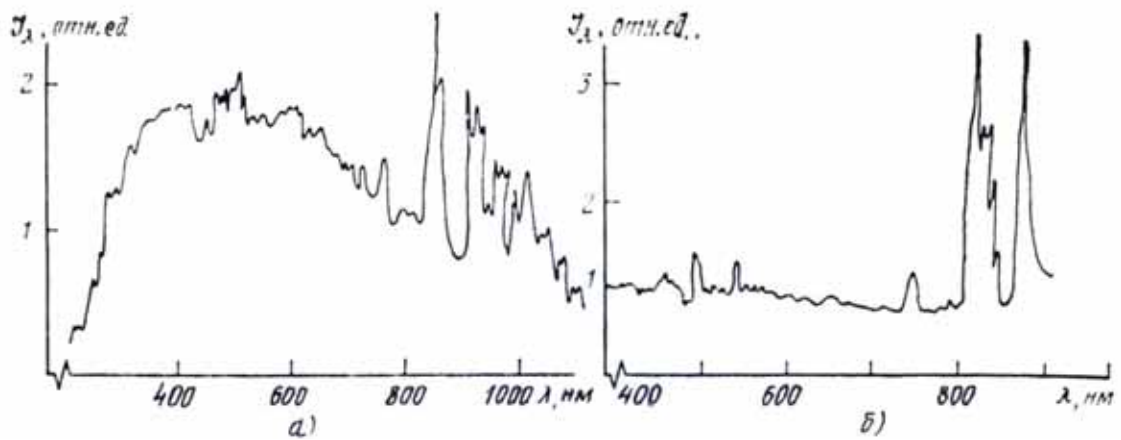


Рис. 1.3.9. Спектр ксеноновой лампы:

а – ИСП-2500 (800 тор, 15 Дж, 150 мкс); б – ИСП-600 (450 тор, 11 Дж, 100 мкс)

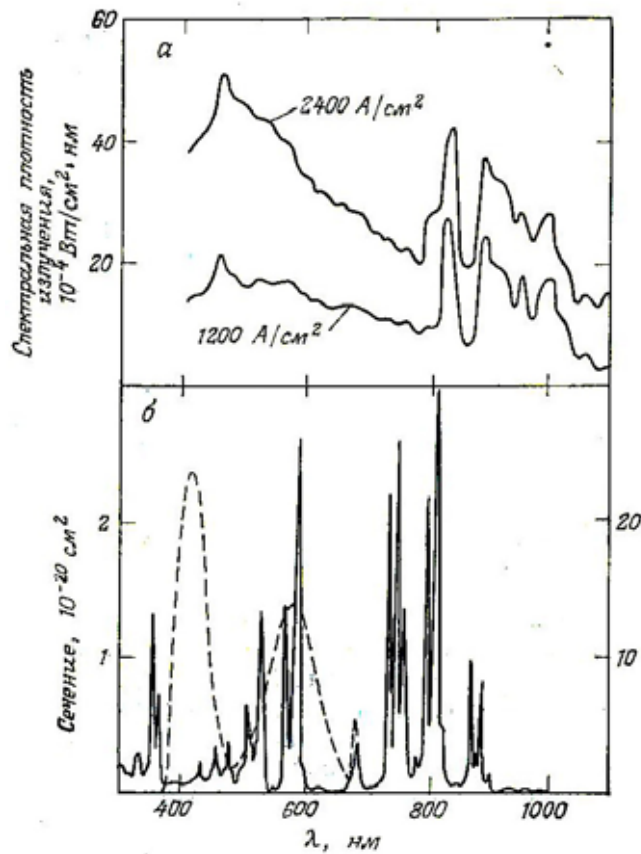


Рис. 1.3.10. Спектр испускания импульсной Хе-лампы при $P = 500$ мм рт. ст. – а. Спектр поглощение активных элементов из $YAG + Nd^{3+}$ – сплошная линия (правая шкала) и для александрита (Cr^{3+}) – пунктир (левая шкала) – б

Для накачки активных элементов из $\text{YAG} + \text{Nd}^{3+}$ используют лампы типа ДПН. Основными электрическими параметрами являются:

- рабочее напряжение питания, которое сверху ограничено напряжением самопробоя $U_{пр}$, а снизу – напряжением зажигания $U_{заж}$;
- параметры поджигающего импульса, его амплитуд, длительность, мощность;
- внутреннее сопротивление $R_{л}$, которое зависит от плотности тока и приблизительно вычисляется как

$$R_{л} = \frac{1,3\left(\frac{l}{d}\right)}{\sqrt{I}}, \quad (1.16)$$

где l – длина между электродами; d – диаметр внутренний; I – ток.

При последовательном включении нескольких ламп в цепь разряда эффективность накачки увеличивается, поскольку относительные потери в разрядной цепи уменьшаются.

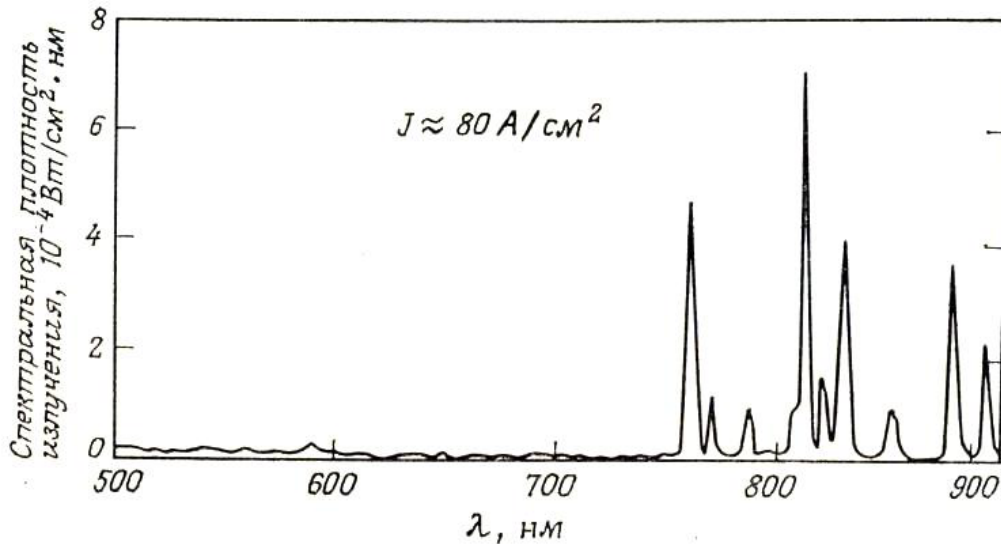


Рис. 1.3.11. Спектр Kr лампы ($P = 4$ атм, 1,3 кВт, 6 мм диаметр)

Одной из важнейших характеристик импульсных ламп является их долговечность. Для каждого типа ламп может быть назван ряд факторов, приводящих к ухудшению световых характеристик (прежде всего к падению интенсивности освещения) или к разрушению импульсной лампы.

Основными механизмами разрушения импульсных ламп являются: термическое разрушение вследствие появления на внутреннем поверхностном слое трубки трещин; появление трещин на внутренней поверхности баллона под действием разбрызгивания капель жидкого металла в ходе эрозии электродов; проявление фазового перехода включений кристобалита в кварцевом стекле.

Квантроны

Упрощенная схема квантрона приведена на рис. 1.3.12. В нем электрическая энергия блока питания преобразуется лампами накачки в световую энергию и направляется осветителем на активный элемент. Осветитель чаще всего изготавливается в виде кварцевого моноблока с отверстиями для ламп и активных элементов, через которые они охлаждаются потоком жидкости (газа). Внешняя поверхность моноблока, который может иметь форму цилиндра или эллипса (с фокальным расположением лампы и АЭ) покрывается слоем серебра. На внешний слой серебра наносится защитное покрытие из меди и никеля. Отражающее покрытие наносится и на боковые стенки моноблока. Возможно применение диффузно рассеивающего отражающего покрытия.

Вид сечения моноблока и вид покрытия выбирают исходя из того, какая нужна структура пучка и эффективность квантрона. При эллипсоидном сечении применяют зеркальный отражающий слой (серебро). В этом случае инверсная населенность АЭ максимальна в центре стержня, что при малых уровнях накачки позволяет работать на одной моде, не прибегая к селекции. При диффузном отражателе (внешняя поверхность моноблока в виде молочного стекла или покрыта слоем MgO) форма сечения моноблока не имеет решающего влияния. Обычно делают упаковку как можно плотнее. При этом можно получить высокую эффективность при однородной по всему сечению АЭ инверсной населенности. Корпус квантрона герметичен. Концы лампы и наконечники стержня уплотняются в корпусе с помощью резиновых прокладок.

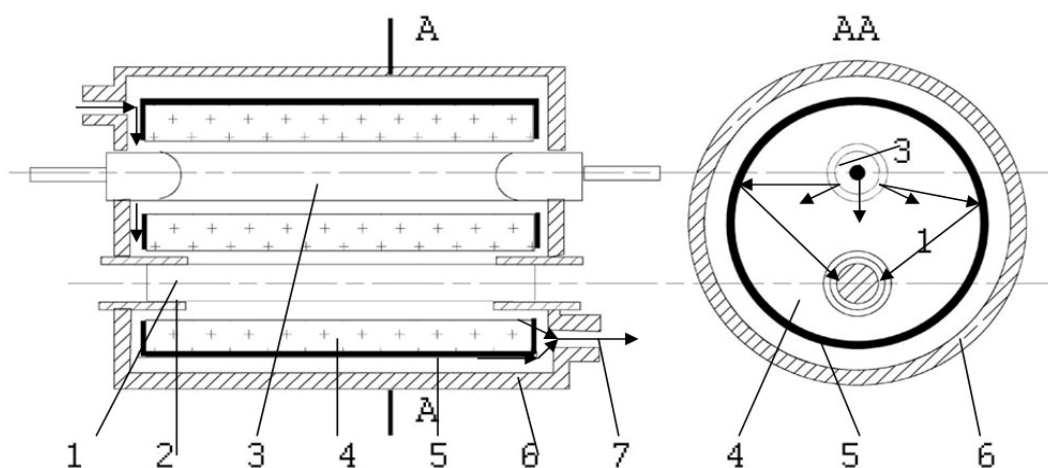


Рис 1.3.12. Схема квантрона К-107:

- 1 – активный элемент (стержень); 2 – наконечники активного элемента;
3 – газоразрядная лампа накачки; 4 – кварцевый блок с отверстиями для активных элементов и ламп; 5 – отражающее покрытие; 6 – корпус;
7 – охлаждающая жидкость (газ)

Перспективно применение двухлампового квантрона с точки зрения улучшения однородности прокачки. При использовании однолампового квантрона возможен изгиб стержня.

Моноблок, лампы и АЭ размещены в корпусе из нержавеющей стали. Охлаждающая жидкость, при больших удельных мощностях накачки (более 10 кВт с см^2 поверхности лампы), должна содержать поглощающие УФ-часть спектра добавки для защиты активного элемента. Особенно это актуально при импульсно-периодической работе ламп, когда высоки пиковые значения тока лампы и пиковая мощность излучения со сдвигом спектра в УФ-область. Если фильтрующие добавки ввести в материал моноблока, то для охлаждения можно использовать чистую дистиллированную воду.

Существуют квантроны с пластинчатой геометрией АЭ, а также с дисковой. В первом случае луч в пластине (пучок) движется зигзагообразно, при этом меньше влияние неоднородностей. Можно получить выходную мощность в несколько кВт при хорошем качестве пучка. Дисковый лазер практически не имеет ограничений по мощности (ограничивает только технология изготовления дисков).

1.3.6. Схема накачки импульсного твердотельного лазера

Проектирование систем накачки для получения устойчивой импульсной генерации излучения лазеров представляет определенную сложность, которая заключается в том, что необходимо обеспечить надежную конструкцию блока питания, обеспечивающего высокие значения энергии накачки 0,4...1,5 кДж и частоты заряда накопителя (0,1...100 Гц). Для получения генерации с частотой > 1 Гц наиболее эффективна система питания, принципиальная схема которой показана на рис. 1.3.13. Выключателем $S1$ подается напряжение на автотрансформатор, с которого часть напряжения поступает на высоковольтный трансформатор $T2$. На выпрямительное устройство поступает напряжение около 1000 В. На выходе выпрямителя включена батарея конденсаторов $C1-C4$ (МБГВ 1000 В, 200 мкФ). Параллельно конденсаторам подключен киловольтметр, позволяющий контролировать напряжение заряда батареи. Это напряжение через блокировочный ключ выключателем $S2$ подается на импульсную лампу (ИЛ) типа ИФП-600. В рабочем состоянии ИЛ постоянно подключена к заряженным конденсаторам, однако это не приводит к вспышке, так как требуемое пробивное напряжение гораздо выше. Для обеспечения вспышки лампы служит система поджига. Напряжение, необходимое для системы поджига (около 400 В), снимается с делителя напряжения, который подключен к выходной обмотке трансформатора $T2$. Для

уменьшения потерь энергии делитель собран на конденсаторах C' , C'' . Снимаемое напряжение равно примерно 400 В. Выпрямленным током заряжается конденсатор $C5$. После включения кнопки пуска $S3$, установленной на пульте управления, конденсатор $C5$ разряжается через первичную обмотку импульсного трансформатора $T3$, во вторичной обмотке которого индуцируется высокое напряжение (18 кВ), достаточное для инициирования разряда в импульсной лампе. Это напряжение подается на внешний электрод ИЛ. Разряд в ИЛ сопровождается мощным импульсом излучения, используемым для оптической накачки лазера.

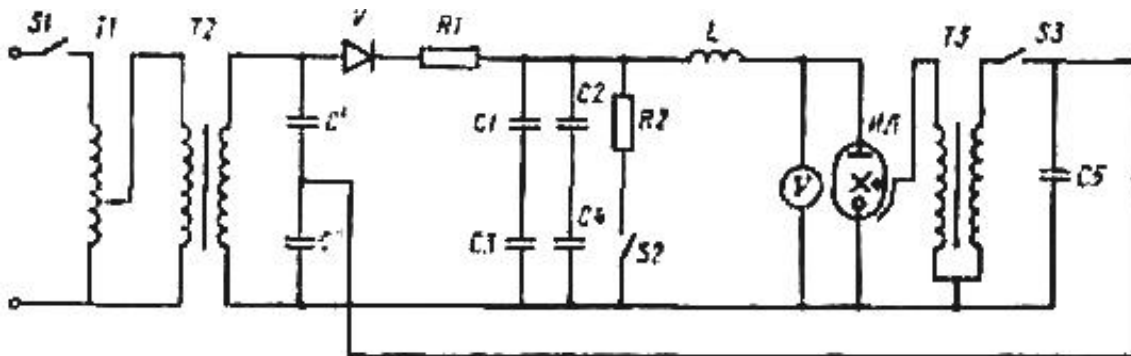


Рис. 1.3.13. Принципиальная электрическая схема блока питания системы накачки

Энергия разряда E_c определяется в основном емкостью C_6 батареи конденсаторов $C1...C4$ и напряжением заряда $U_{зар}$, т. е. $E_c = C_6 U^2 / 2$. Для $C_6 = 200$ мкФ и напряжения $U = 2$ кВ энергия $E_c = 400$ Дж.

Так как в момент разряда ток очень велик, то, чтобы обратный ток диода не превышал номинального, в его цепь включено сопротивление $R1 = U_{зар} / I_{обр}$, где $I_{обр}$ – обратный ток диода V . Для диодов, обычно используемых в подобных схемах, его величина составляет 0,1 А, тогда $R1 = 20$ кОм. Для определения времени заряда батареи C_6 необходимо определить постоянную времени $\tau = R1 C_6$. Далее, считая, что время заряда $t_{зар} = 5\tau$, получаем $t_{зар} = 20$ с. Индуктивность L служит для предохранения ИЛ от сильного скачка тока, и ее величина выбирается из соотношения $L = C_6 R_l / k^2$. Для коэффициента k , зависящего от режима работы контура и формы разрядного импульса, при сопротивлении лампы $R_l \sim 0,2$ Ом, значение индуктивности составляет около 8,2 мкГн. Блок оптической накачки, разработанный по данной схеме, обеспечивает интенсивную оптическую накачку активного элемента в диапазоне длин волн 0,3...0,7 мкм, создавая тем самым условия для вынужденного когерентного излучения твердотельного лазера.

1.4. Полупроводниковые лазеры

В полупроводниках так же возможно получение усиления и генерации света. Однако в естественных условиях, при отсутствии какого-либо внешнего воздействия на полупроводник, электронно-дырочные пары возникают и исчезают в результате теплового движения и спонтанного испускания фотонов, причем в полупроводнике устанавливается *тепловое равновесие* электронов проводимости и дырок друг с другом. При тепловом равновесии вблизи потолка валентной зоны E_v всегда больше электронов, чем дырок. Поэтому, несмотря на то, что при освещении полупроводника вероятность единичного акта образования электронно-дырочной пары с поглощением фотона точно равна вероятности рекомбинации электронно-дырочной пары с испусканием фотона, общее число актов поглощения преобладает. Это означает, что полупроводник при тепловом равновесии, как и др. вещества, способен лишь поглощать, а не усиливать свет.

Инверсия населенностей в полупроводнике

Для того чтобы заставить полупроводник усиливать падающий свет, а не поглощать его, необходимо сильно нарушить в нем тепловое равновесие с тем, чтобы электроны плотно заполнили область, примыкающую ко дну зоны проводимости E_c , а дырки плотно заполнили область у потолка валентной зоны E_v . При этом, вследствие равенства вероятностей единичных актов рождения и рекомбинации электронно-дырочных пар, число актов рекомбинаций будет преобладать. Поэтому такой полупроводник будет усиливать свет за счет вынужденного испускания фотонов. Состояние полупроводника, при котором большинство уровней в нижней части зоны проводимости занято электронами или в верхней части валентной зоны – дырками, называется вырожденным (рис. 1.4.1).

Наивысший уровень энергии μ_e , до которого электроны плотно заполняют зону проводимости, называется уровнем Ферми для электронов проводимости. Аналогичная картина наблюдается и для дырок, только в этом случае уровень Ферми для дырок μ_d расположен в валентной зоне и с увеличением числа дырок опускается вниз.

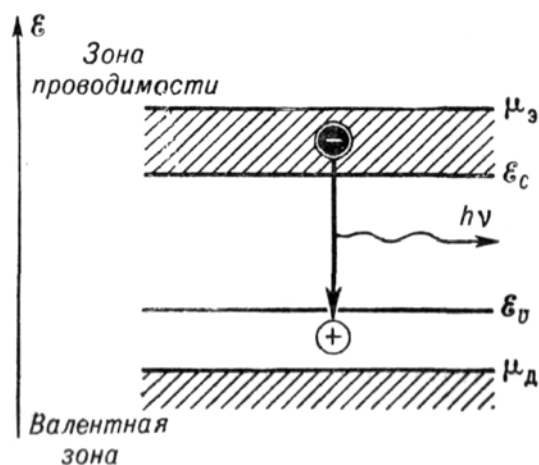


Рис. 1.4.1. Энергетическая схема вырожденного полупроводника (вырождены электроны и дырки)

Если в полупроводнике вырождены одновременно электроны и дырки, то расстояние между уровнями Ферми для электронов μ_e и для дырок μ_d больше, чем ширина запрещенной зоны, т. е.

$$\mu_e - \mu_d > \Delta E. \quad (1.17)$$

Данное выражение является условием инверсии населенностей. Если теперь пропустить через вырожденный полупроводник свет, энергия квантов которого лежит в интервале от $h\nu_{\max} = (\mu_e - \mu_d)$ до $h\nu_{\min} = (E_e - E_d) = \Delta E$, то такие фотоны не могут вызвать электронных переходов из валентной зоны в зону проводимости и, следовательно, не могут поглотиться в полупроводнике. В то же время эти фотоны могут «столкнуться» электроны из зоны проводимости в валентную зону, т. е. вызвать вынужденную рекомбинацию. При этом рождаются фотоны, точно совпадающие по своим свойствам с первичными. Такой полупроводник может усиливать свет в полосе частот $\Delta\nu = \nu_{\max} - \nu_{\min}$. Ширина этой полосы будет определяться степенью вырождения электронов и дырок полупроводника.

Создать в чистых полупроводниках, не содержащих примесей, одновременно вырождение электронов и дырок трудно. Этого легче добиться в примесных полупроводниках, в которых уже вырождены либо электроны, либо дырки, что осуществляется введением в полупроводниковый кристалл определенных примесей. Примесные атомы могут вызывать появление дополнительных уровней в запрещенной зоне энергетического спектра полупроводника. При этом атомы, легко отдающие электроны (доноры), образуют уровни в запрещенной зоне вблизи дна зоны проводимости E_c , а атомы, легко воспринимающие дополнительные электроны (акцепторы), образуют уровни вблизи верхнего края валентной зоны E_v . При преобладании донорных примесей полупроводник называется полупроводником «*n*-типа», а при преобладании акцепторных примесей – полупроводником «*p*-типа».

Если взять два полупроводника *n*- и *p*-типов, в которых электроны и дырки вырождены, и соединить их (рис. 1.4.2, а), то в месте соединения, называемое *электронно-дырочным переходом* или *p–n-переходом*, может быть выполнено условие инверсии населенностей: $\mu_e - \mu_d > \Delta E$.

Часть электронов проводимости из *n*-области очень быстро перейдет в *p*-область, а часть дырок из *p*-области – в *n*-область. В процессе этого перехода электроны и дырки будут рекомбинировать друг с другом, излучая фотоны. Эти фотоны не могут поглощаться в *p–n*-переходе, а следовательно, свет будет усиливаться до тех пор, пока выполняется условие $\mu_e - \mu_d > \Delta E$. Однако это условие будет выполнено в области перехода только в первый момент присоединения полупроводников. Через небольшое время движение электронов и дырок прекратится. Они перераспределятся по энергетиче-

ческим уровням и придут в равновесие друг с другом. Уровни Ферми в p - и n -областях совместятся (рис. 1.4.2, б), а в области p - n -перехода исчезнет одновременное вырождение электронов и дырок, а следовательно, и инверсия населенностей.

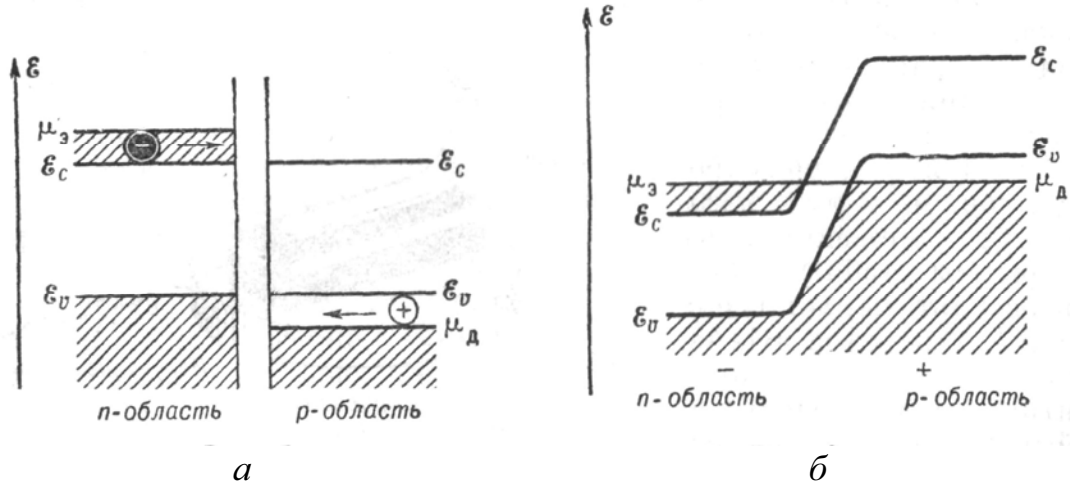


Рис. 1.4.2. Энергетическая схема:
 а – p - n -перехода в момент соединения полупроводников;
 б – p - n -типа после установления равновесия

Для того чтобы снова создать инверсию населенностей в p - n -переходе, т. е. добиться, чтобы уровни Ферми в n - и p -областях снова разошлись на расстояние, большее ширины запрещенной зоны ΔE , нужно приложить к переходу электрическое напряжение V , как показано на рис. 1.4.3. При этом через p - n -переход потечет электрический ток, состоящий из двух компонент: электронов и дырок,двигающихся навстречу друг другу.

Эти два потока частиц встречаются в тонком слое перехода и рекомбинируют, излучая свет. Так как встречные потоки частиц будут поддерживать в переходном слое концентрацию, достаточную для вырождения электронов и дырок, то при этом условии $\mu_n - \mu_p > \Delta E$ будет выполнено. Условие инверсии в p - n -переходе выполняется с тем большим запасом, чем выше электрическое поле в переходе, т. е. чем больший ток протекает через переход. Минимальный ток, при котором вы-

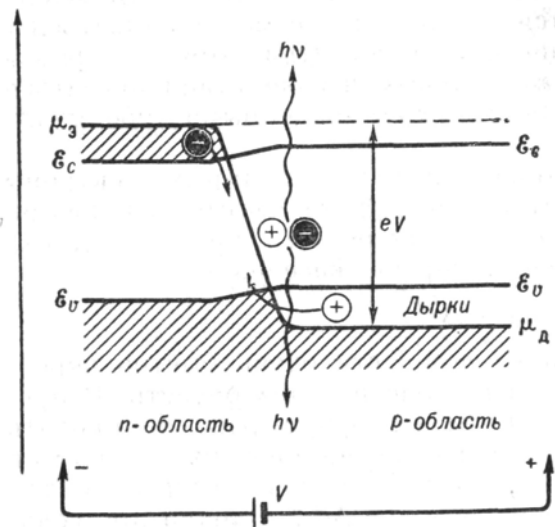


Рис. 1.4.3. Энергетическая схема p - n -перехода при наложении напряжения V (e – заряд электрона)

нужденное излучение *сравнимо* с поглощением (потерями) света в *p-n*-переходе, называется пороговым током. Если ток, пропускаемый через *p-n*-переход, больше порогового, то *p-n*-переход является усиливающей средой для света, распространяющегося в его плоскости.

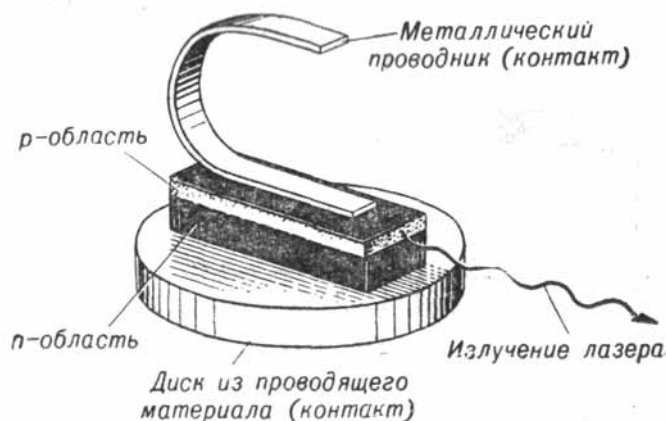


Рис. 1.4.4. Схематическое изображение полупроводникового лазера

Для получения генерации нужно ввести обратную связь, т. е. *p-n*-переход нужно поместить между зеркалами. В полупроводнике роль зеркал обычно выполняют гладкие грани самого полупроводникового кристалла (рис. 1.4.4).

Имеется ряд полупроводников, из которых готовят инжекционные лазеры (табл. 2). Лучшие

результаты дает лазерный *p-n*-переход в GaAs. Он излучает до 10 Вт когерентного света с очень малой площади (толщина излучающего слоя *p-n*-перехода ~ 2 мкм, а длина излучающей части – 1 мм). Мощность, снимаемая с 1 см^2 , достигает 100 кВт. Существенно, что такие мощности удается получать в непрерывном режиме, т. е. при питании лазера постоянным током. В импульсном режиме лазер на основе GaAs при температуре жидкого азота излучает импульсы с мощностью до 100 Вт. КПД полупроводниковых лазеров достигает 50 % и более.

Таблица 2

Полупроводник	Рабочая температура, К	Длина волны излучения, нм	Цвет излучения
ZnS	80	330	Ультрафиолетовый
ZnSe	80	453	Фиолетовый
CdS	4...300	485...796	Зеленый
CdSe	80	610	Оранжевый
CdTe	80	790...796	Красный
GaPAs	80...300	636...830	Темно-красный
GaAs	4...300	820...900	Инфракрасный
GaSb	20	1530	Инфракрасный

Лазеры на *p-n*-переходе имеют очень малые размеры. Расстояние между зеркалами, т. е. размеры резонатора, $\sim 0,2...0,5$ мм, поперечный размер кристалла тот же, а толщина *p-n*-перехода $\sim 0,1$ мкм. Электроны и

дырки «проскакивают» область p - n -перехода и проникают в n - и p -части на глубину $\sim 1 \dots 2$ мкм. Поэтому светящийся слой оказывается толще переходного. Малые размеры лазерных p - n -переходов связаны с невозможностью изготовить оптически однородный p - n -переход больших размеров.

Так как размеры резонатора полупроводниковых лазеров малы, то даже идеальный инжекционный лазер не обладает такой высокой направленностью излучения, как газовые лазеры и рубиновые лазеры. В действительности направленность излучения полупроводникового лазера на p - n -переходе еще хуже из-за не идеальности самого перехода.

Раздел 2 ОПТИКА ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

2.1. Формирование, свойства, транспортировка и фокусировка лазерных пучков

2.1.1. Пучки простейшей структуры

Реальный пучок представляет собой пространственный лучевой пакет, где каждый луч занимает определенное положение и имеет определенное направление распространения по отношению к оси пучка. В целом пучок характеризуется размером и угловой расходимостью, причем за угловую расходимость пучка принимают угол, под которым распространяется наиболее «косой» луч, а за размер – диаметр или площадь сечения пучка в какой-либо из точек на его оси.

Обычно сечение пучка, проходящее через поверхность источника, принимают за его начало, однако в общем случае за начало пучка можно принимать его сечение в любой из точек на его оси Z .

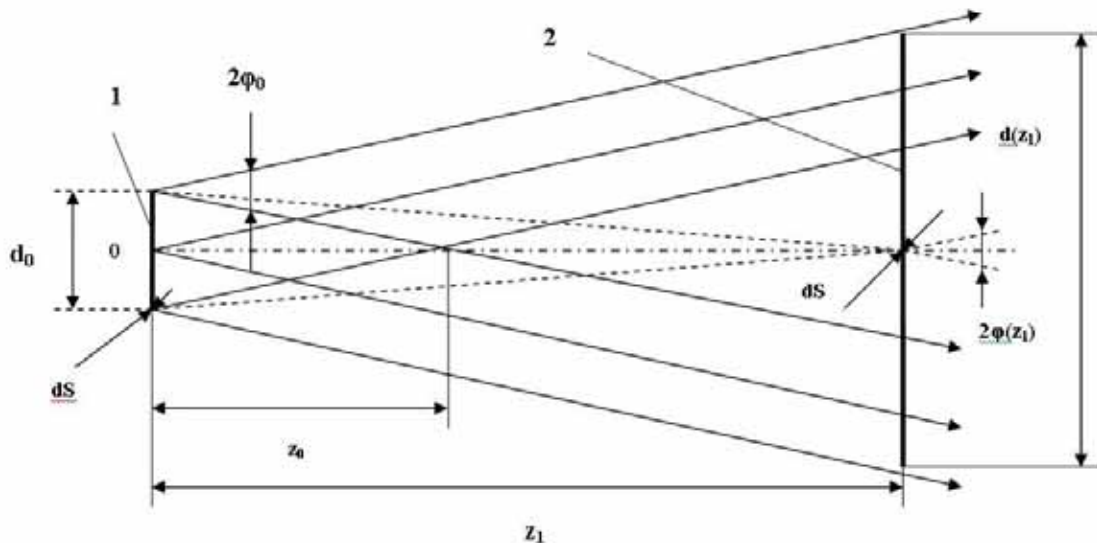


Рис. 2.1.1. Пучок простейшей структуры:

1 – начало пучка; 2 – сечение пучка в точке $Z = Z_1$; d_0 – начальный линейный размер пучка ($Z = 0$); $2\phi_0$ – начальная угловая расходимость лучей пучка с вершиной в точке $Z = Z_0$ (на площадке dS); Z_0 – расстояние до границы ближней зоны; $2\phi(Z_1)$ – полная текущая угловая расходимость элементарного гомоцентрического пучка в сечении $Z = Z_1$ с вершиной в точке (на площадке dS)

Пучки различных источников различаются по своей структуре. Пучок простейшей структуры имеет одинаковую плотность потока лучей по поперечному сечению источника и одинаковую угловую расходи-

мость лучей со всех элементов сечения. Лучевое представление пучка простейшей структуры показано на рис. 2.1.1. Очевидно, что по мере распространения пучка по оси Z площадь его сечения увеличивается, а текущая угловая расходимость уменьшается:

$$d(Z) = d_o + 2\text{tg}\phi_o \cdot Z, \quad (2.1)$$

$$2\text{tg}\varphi(Z) = d_o / Z. \quad (2.2)$$

Положение границы ближней зоны определяется соотношением:

$$Z_o = \frac{d_o}{2\text{tg}\phi_o} \quad (2.3)$$

Пучки, излучаемые лазерами различных типов, имеют достаточно сложную структуру, которая определяется конструкцией резонатора и модовым составом излучения. Даже одномодовый (дифракционный) пучок нельзя в строгом смысле считать простейшим.

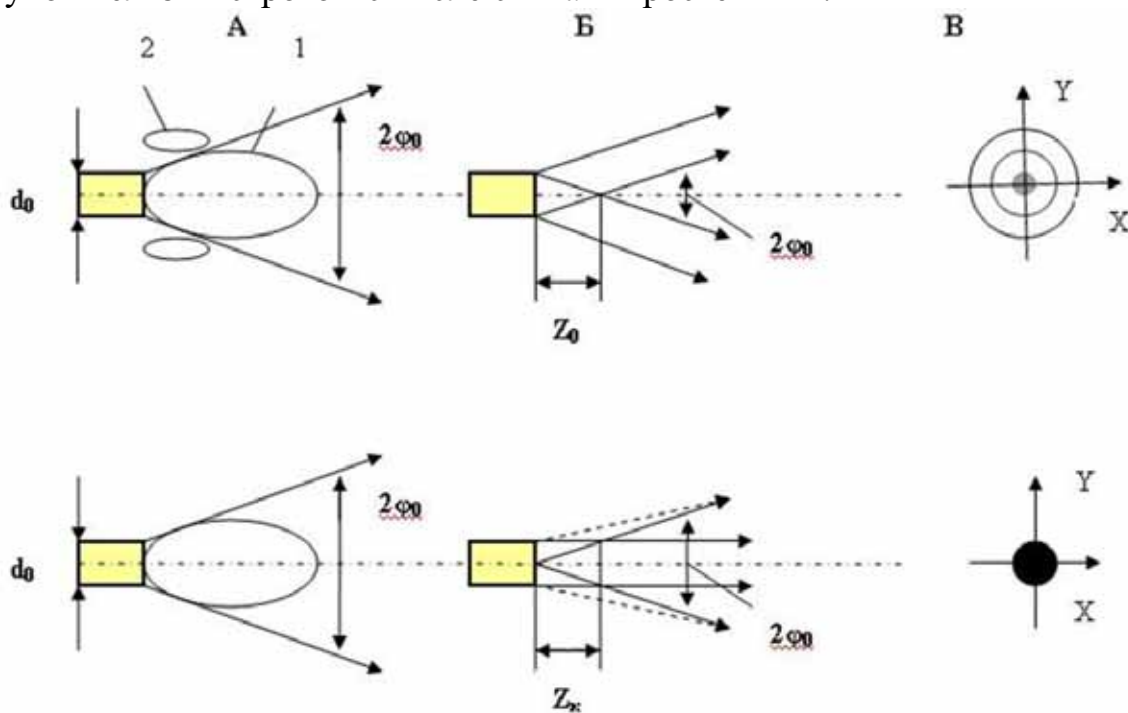


Рис. 2.1.2. Пространственно-угловая структура одномодовых лазерных пучков:
 сверху – дифракционный пучок, сформированный в плоском резонаторе;
 внизу – гауссов пучок, сформированный в сферическом резонаторе;
 А – угловая диаграмма (лепесток); Б – лучевое представление;
 В – форма пятна в фокусе линзы

Так плоский резонатор лазера формирует (по данным некоторых авторов*) многолепестковый дифракционный пучок, соответствующий пучку при дифракции на круглом отверстии. На выходе сферического резона-

* Справочник «ЛЭЛОМ» под редакцией Н.Н. Рыкалина

тора формируется гауссов пучок, в котором отсутствуют боковые лепестки, однако угловая расходимость лучей по сечению пучка различна (максимальна в центре и убывает на периферии пучка, см. рис. 2.1.2). Верхний пучок описывается в первом приближении выражениями (2.1...2.3). Для гауссова пучка запись основных параметров несколько иная:

$$d^2(Z) = d_o^2 + (2\varphi_o^o \cdot Z)^2 = d_o^2 \left[1 + \left(\frac{Z}{Z_k} \right)^2 \right], \quad (2.4)$$

$$2\text{tg}\varphi(Z) = d_o^o / Z, \quad (2.5)$$

$$Z_k = d_o^o / 2\text{tg}\varphi_o^o. \quad (2.6)$$

При многомодовом режиме излучения лазера структура пучков, показанных на рис. 2.1.2 усложняется, в частности, начальный размер пучка (d_o^o) и угловая расходимость ($2\varphi_o^o$) увеличиваются в m раз, где m – модовое число*. В этом случае

$$\begin{aligned} d_o &= d_o^o \cdot m, \\ 2\varphi_o &= 2\varphi_o^o \cdot m. \end{aligned} \quad (2.7)$$

Тогда для грубых оценок для многомодового пучка можно использовать формулы (2.1...2.6) с учетом (2.7).

В реальных лазерных установках могут возникать дополнительные искажения параметров на оптических и тепловых неоднородностях в активных средах и оптических элементах.

2.1.2. Фазовый объем и габаритный фазовый объем (ГФО) лазерных пучков

Фазовый объем пучка V определяется соотношением:

$$V = \int_s n^2 \Omega^{(s)} dS = \text{const}, \quad (2.8)$$

где n – показатель преломления среды; dS – элемент площади поперечного сечения пучка; $\Omega^{(s)}$ – текущая телесная расходимость элементарного гомоцентрического пучка с вершиной на площадке dS .

В общем случае вычислить фазовый объем сложно, но для пучков простейшей структуры (ламбертовское приближение, см. рис. 2.1.1), где Ω не зависит от положения площадки dS на осях координат x и y , он вычисляется просто:

$$V = (\pi \cdot n 2\varphi_o \cdot d_o)^2 = [\pi \cdot n \cdot 2\phi(Z_1) \cdot d(Z_1)]^2 \quad (2.9)$$

* m – количество мод в плоскости сечения чертежа.

При выводе (2.9) принималось $\Omega \approx (2\varphi_o)^2$, что справедливо для лазерных пучков при малых значениях $2\varphi_o$.

Фазовый объем V постоянен в любом сечении пучка на его оси Z , поскольку с увеличением его размера $d(Z)$ уменьшается текущая угловая расходимость пучка $2\varphi(Z)$ в соответствии с формулой (2.2) и (2.5).

Во многих случаях для описания пучков пользуются понятием габаритного фазового объема (ГФО), который определяется как

$$\text{ГФО} = n^2 \Omega_o \cdot S, \quad (2.10)$$

где Ω_o – полная начальная телесная расходимость пучка (угловой конус, в который вписывается пучок); S – площадь сечения пучка.

Таким образом, ГФО характеризует объем, в который вписан пучок. Очевидно, что по мере удаления от начала пучка его ГФО растет.

Если пучок распространяется в воздухе ($n = 1$), то ГФО имеет простой вид:

$$\text{ГФО} = \Omega_o \cdot S. \quad (2.11)$$

Для практики интерес представляет проекция ГФО на плоскость чертежа:

$$I_o = n \cdot \sin \varphi_o \cdot d_o \approx \text{tg} \varphi_o \cdot d_o \cdot n. \quad (2.12)$$

Выражение (2.12) по форме напоминает известный инвариант Лагранжа–Гельмгольца. Для гауссовых и дифракционных пучков выражение (2.12) инвариантно, т. е. после преобразования идеальной оптической системой (например, сферической линзой) в сопряженных плоскостях инвариант I_o остается постоянным ($I_o = \text{const}$), т. е. величина инварианта I_o накладывает жесткие условия на параметры преобразованного пучка.**

При записи (2.12) использовался переход от телесного угла к плоскому:

$$d\Omega = \sin \varphi_o \cdot d\varphi_o \cdot d\Psi,$$

где $d\Omega$ – элемент телесного угла; $d\varphi_o$ – элемент полярного угла.

* Выражение $d_o \cdot \text{tg} \varphi_o$ является по форме аналогом известного инварианта Лагранжа–Гельмгольца, однако имеет другой физический смысл.

** Под жесткими условиями преобразования подразумевается то, что, например, при уменьшении размера пучка на мишени нельзя одновременно получить достаточно малый размер пучка и малую угловую расходимость (для жесткой фокусировки), поскольку их произведение должно быть не менее значения I_o исходного пучка. Другими словами, линейное изменение размера пучка обратно пропорционально угловому размеру.

Для других типов пучков выражение (2.12) не инвариантно и в большинстве случаев проекция ГФО и сам ГФО после преобразования увеличиваются* по сравнению с исходными значениями.

Таким образом, в отличие от фазового объема, который постоянен в любом сечении пучка до и после преобразования идеальной оптической системой, ГФО и его проекция возрастают по мере распространения пучка, а после его преобразования или равны исходным значениям (дифракционный и гауссов пучки) в сопряженных плоскостях, или превышают их (пучок простейшей структуры). Очевидно, что при переходе в среду с показателем преломления n ГФО изменяется, и соответственно изменяется и яркость пучка в n^2 раз.

Оценим величину ГФО одномодовых пучков. Для дифракционного пучка, выходящего из плоского резонатора лазера и имеющего диаметр d_o^o , угловая расходимость

$$2\varphi_o^o = \frac{2,44\lambda_o}{d_o} \quad (2.13)$$

Тогда проекция ГФО

$$I_o^o = 2\text{tg}\varphi_o^o \cdot d_o^o \approx 2\varphi_o^o \cdot d_o^o = 2,44\lambda_o, \quad (2.14)$$

где λ_o – длина волны излучения. Для гауссова пучка

$$I_o \approx 2\varphi_o \cdot d_o = \frac{4\lambda_o}{\pi \cdot d_o} \cdot d_o = \frac{4\lambda_o}{\pi} \approx 1,3\lambda_o, \quad (2.15)$$

то есть величина проекции ГФО дифракционных и гауссовых пучков соизмерима с длиной волны излучения.

2.1.3. Формирование лазерного излучения в резонаторе

2.1.3.1. Оптические схемы технологических лазеров

Практически все схемы лазеров реализуются на двух типах резонатора – с плоскими и сферическими зеркалами. Из различных типов резонаторов наиболее часто используемый резонатор – *плоскопараллельный (резонатор Фабри-Перо)* (рис. 2.1.3). Этот резонатор состоит из двух плоских зеркал, расположенных параллельно друг другу.

В первом приближении моды такого резонатора можно представить себе как суперпозицию двух плоских электромагнитных

* Это имеет важное значение в тех случаях, когда ГФО приемника $(d_{np} \cdot 2\text{tg}\varphi_{np} \cdot n)^2$ имеет величину, сравнимую с ГФО пучка, и возникают сложности по согласованному (без потерь) вводу излучения в приемник.

волн, распространяющихся в противоположных направлениях вдоль оси резонатора.

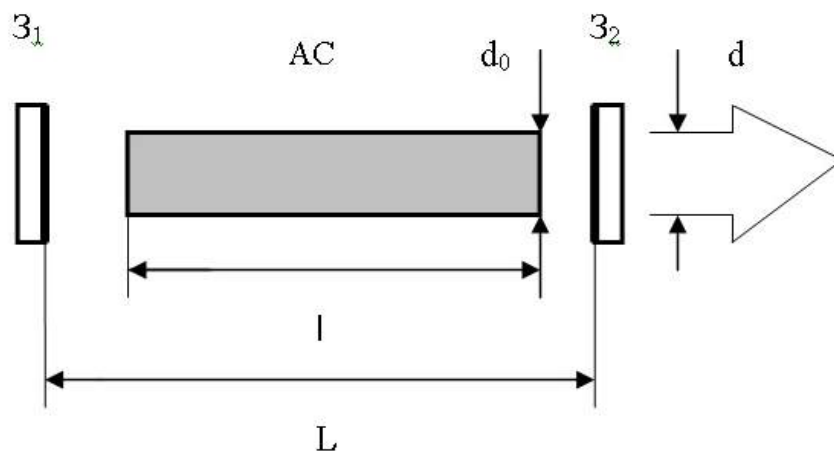


Рис. 2.1.3. Оптическая схема плоскопараллельного резонатора

В данной схеме, если оптическая длина резонатора

$$L_{omn} = L + (n - 1) \cdot l, \quad (2.16)$$

где L – длина резонатора; l – длина активной среды (АС); n – показатель преломления АС, обычно реализуется многомодовый режим генерации TEM_{mnq} при условии

$$d_0 > 2\sqrt{\lambda_0 L_{omn}}, \quad (2.17)$$

где λ – длина волны генерации; d_0 – диаметр АС;

$$2\sqrt{\lambda_0 L_{omn}} = d_0^0 \rightarrow \text{размер нулевой моды.} \quad (2.18)$$

Зеркала резонатора устанавливаются с точностью от нескольких угловых секунд (случай однородной АС, например, стекло $+Nd^{3+}$) до (1...2) угловых минут (оптически неоднородная среда). Коэффициент отражения выходного зеркала определяется геометрией резонатора и активного элемента, усилением активной среды и т. д. Отражающие покрытия могут быть расположены наружу резонатора или вовнутрь. В первом случае увеличивается оптическая прочность, в силу нахождения незащищенных поверхностей зеркал в зоне с меньшей плотностью потока. Границы раздела являются также отражающими поверхностями, образуют систему связанных дополнительных резонаторов числом в пять штук, которые эффективно селективируют продольные моды. Торцы активного элемента (выходные окна газоразрядных трубок в случае газового лазера), если они съюстированы с резонатором, также могут дополнительно давать обратную связь и селективировать продольные моды. Кроме того, на них может возникать генерация, которую можно считать паразитной. Поэтому торцы стержней активных элементов (окна) необходимо или просветлять на длину волны излучения, или обрабатывать

под достаточно большим углом, например под углом Брюстера, что уменьшит потери и снизит порог генерации. Во втором случае влияние дополнительных поверхностей меньше, менее эффективна селекция, однако больше оптическая нагрузка на поверхности отражающих покрытий, что может привести к их разрушению (особенно в условиях загрязнения). В этом случае обязательна герметизация резонатора. Условия для расходимости лазерного пучка такого резонатора $2\varphi_0$ можно записать следующим образом:

$$2\varphi_0 \approx \frac{2,44\lambda}{2\sqrt{\lambda L_{omn}}} \cdot (m+1), \text{ при } (m+1) = \frac{d_0}{d_0^0} = \frac{d_0}{2\sqrt{\lambda_0 L_{omn}}}, \quad (2.19)$$

где $\frac{2,44\lambda_0}{2\sqrt{\lambda_0 L_{omn}}} = 2\varphi_0^0$ – угловая расходимость нулевой моды; (2.20)

m – модовый индекс (модовое число). Инвариант пучка

$$I_0 = 2\varphi_0 \cdot d_0, \\ I_0 = \frac{2,44\lambda(m+1) \cdot d_0^0 \cdot (m+1)}{2\sqrt{\lambda L_{omn}}} = \frac{2,44\lambda \cdot d_0^0}{d_0^0} (m+1)^2 = 2,44\lambda(m+1)^2. \quad (2.21)$$

Импульс оптической накачки для твердотельного лазера имеет гладкую колоколообразную форму, в то время как импульс генерации носит прерывистый характер в виде хаотичных во времени импульсов длительностью около 1 мкс (10^{-6} с) с малой скважностью. Инверсная населенность практически повторяет форму импульса накачки. Генерация начинается с некоторой задержкой τ_3 , определяемой временем создания населенности, превышающей порог. По этой же причине генерация заканчивается несколько раньше накачки. По порядку величины длительность генерации совпадает с длительностью накачки. При непрерывной накачке лазер излучает непрерывно, но в средах с большим коэффициентом усиления (твердотельный лазер) может наблюдаться временная модуляция амплитуды (пиковый режим) за счет резкого изменения уровня инверсной населенности.

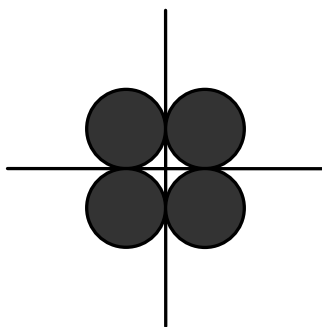


Рис. 2.1.4. Модовый состав лазерного пучка на моде TEM_{11q}

Пространственная структура пучка обычно имеет выраженный модовый состав и при малом их количестве выглядит в виде отдельных пятен (рис. 2.1.4).

При большем количестве мод (количество определяется как величиной L_{omn} , так и коэффициентом усиления) картина сложнее. Эта картина является результатом интерференции поперечных (угловых) мод. Необходимо помнить, что процесс интерференции и перераспределения поля идет

не только в резонаторе, но и на всем протяжении распространения пучка. Необходимо также отметить, что это распределение «мгновенное» и во время импульса генерации может менять картину, и если приемник инерционен (например, интегрирует за время импульса), то модовый состав не обнаруживается (замазывается).

Для ТЛ помимо высокого качества пучка (малая расходимость и малые значения ГФО) важным параметром является мощность излучения (энергия). Обычно повышение мощности достигается за счет увеличения рабочего объема АС. В твердотельных импульсных лазерах на размеры АС существуют определенные ограничения (сложность изготовления кристаллов больших размеров, оптическая прочность элементов и т. д.). Так, в мощных твердотельных лазерах обычно в одном резонаторе устанавливают несколько квантронов. При этом плотность энергии в импульсе на поверхностях оптических элементов резонатора не должна превосходить их оптическую прочность, которая приблизительно для $\tau_n \sim 10^{-3}$ с составляет величину в несколько сотен джоулей на кв.см. Для пучка со стандартным сечением $\sim 0,3 \text{ см}^2$ общая длина АС не должна превышать 100 см.

В газовых лазерах нет такого ограничения на размер активной среды, как в твердотельных лазерах. В качестве ограничения можно рассматривать только техническую возможность реализации накачки больших газовых объемов.

Спектральный состав излучения, реализуемый схемой на рис. 2.3, обычно является довольно сложным. Количество продольных мод определяется шириной полосы вынужденного перехода $\Delta\nu$, частотным интервалом между модами резонатора $\Delta\nu_p = c/2L_{opt}$ и частичной селекцией аксиальных мод.

2.1.3.2. Резонаторы со сферическими зеркалами

Резонаторы со сферическими зеркалами разделяются на устойчивые и неустойчивые. Критерий устойчивости выражается через безразмерный параметр q (геометрический фактор):

$$q_i = (1 - L/R_i), \quad (2.22)$$

где L – длина резонатора; R_i – радиус соответствующего зеркала.

В резонаторе знак радиуса кривизны R берется положительным для вогнутого зеркала и отрицательным для выпуклого зеркала.

Резонатор является устойчивым, если для него выполняется следующее условие:

$$0 < q_1 \cdot q_2 < 1 \quad (2.23)$$

За этими границами резонатор будет неустойчивым.

С физической точки зрения резонатор называется неустойчивым, когда произвольный луч, последовательно отражаясь от каждого из двух зеркал, удаляется на неограниченно большое расстояние от оси резонатора. Наоборот, резонатор, в котором луч остается в пределах ограниченной области, называется устойчивым.

Рассмотрим несколько типов резонаторов со сферическими зеркалами.

Концентрический (сферический) резонатор состоит из двух сферических зеркал, имеющих одинаковые радиусы R и расположенных на расстоянии L друг от друга таким образом, что центры кривизны зеркал C_1 и C_2 совпадают (т. е. $L = 2R$) (рис. 2.1.5).

На рис. 2.1.5. показан также геометрический ход лучей в данном резонаторе. В этом случае моды резонатора представляют собой приближенно суперпозицию двух сферических волн, исходящих из точки C и распространяющихся в противоположных направлениях. Данный резонатор относится к типу устойчивых, поскольку при $R_1 = R_2$ выполняется условие устойчивости.

Преимущество такого резонатора – нечувствительность к юстировке. Сбой юстировки на несколько угловых минут не приводит к ухудшению генерационных характеристик, что важно для технологических лазеров во время эксплуатации. Пространственное распределение отличается от распределения в условиях плоского резонатора. Пиковая структура импульса генерации, характерная для твердотельных лазеров, выражена не так ярко. Причина этого заключается в пространственном перемешивании пучков (а также во времени) с различными начальными моментами развития процесса генерации. Подбором L и R можно добиться квазистационарного во времени излучения (почти гладкий импульс генерации). Частотный спектр имеет такой же характер, как и в других схемах.

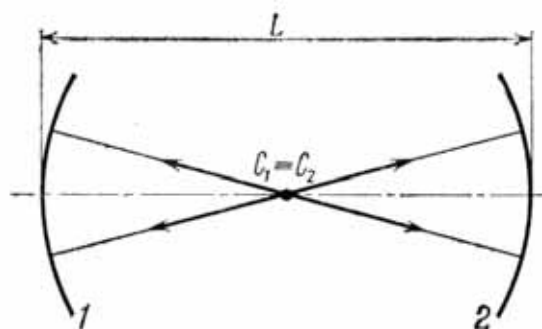


Рис. 2.1.5. Концентрический резонатор

Конфокальный резонатор состоит из двух сферических зеркал с одинаковыми радиусами кривизны R , которые расположены на расстоянии L друг от друга таким образом, что фокусы зеркал F_1 и F_2 совпадают. Отсюда следует, что центр кривизны C одного зеркала лежит на поверхности второго зеркала (т. е. $L = R$). С помощью геометрической оптики, изменяя расстояние от двух параллельных лучей до оси резона-

тора $C_1 C_2$, можно нарисовать сколько угодно замкнутых оптических траекторий типа той, что показана на рис. 2.1.6.

Расстояние от перетяжки до зеркала называют конфокальным параметром Z_k

$$Z_k = \frac{L}{2} = \frac{R}{2} = f'; \quad (2.24)$$

$$R_1 = R_2 = R.$$

Начало пучка в перетяжке. В конфокальном резонаторе перетяжка пучка находится в центре резонатора. Здесь угловая расходимость пучка наибольшая в центре и уменьшается к периферии пучка. Распределение энергии в пучке гауссово. Размер d_0^0 условен. В этом кружке содержится 86 % энергии пучка. В любом сечении по оси Z распределение сохраняется гауссово. Это все справедливо для низшей моды TEM_{00q} . В случае работы лазера в многомодовом режиме картина пучка усложняется. На рис. 2.1.7 приведено распределение интенсивности излучения для пучков низших мод.

Конфокальный резонатор редко используется в технологических лазерах, поскольку пучок в перетяжке в 1,4 раза меньше, чем на зеркале. Поэтому активный элемент заполнен не эффективно (не весь). В этом смысле предпочтительнее резонаторы с большими значениями R и малыми L , т. е. зеркала сдвинуты друг к другу. В общем случае радиусы R_1 и R_2 могут быть различны, и перетяжка пучка смещена относительно центра резонатора. Формулы (2.25...2.31), которые связывают параметр конфокального резонатора Z_k с размером пучка d на расстоянии Z от перетяжки, начальным диаметром пучка d_0 , расходимостью пучка $2\varphi_0$ и радиусом волнового фронта пучка на расстоянии Z , приведены ниже:

$$d^2(Z) = d_0^2 \left[1 + \left(\frac{Z}{Z_k} \right)^2 \right], \quad (2.25)$$

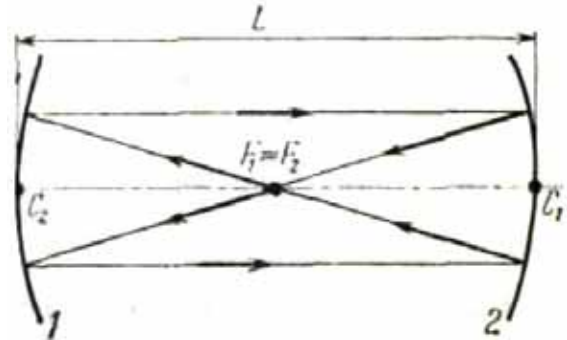


Рис. 2.1.6. Конфокальный резонатор

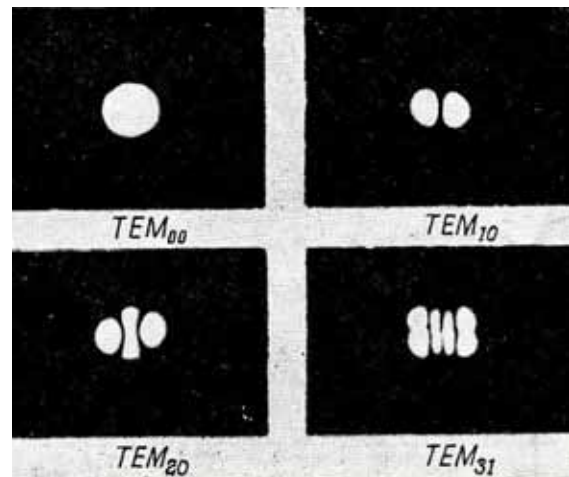


Рис. 2.1.7. Модовый состав лазерного пучка в конфокальном резонаторе

$$d_0 = 2\sqrt{\frac{\lambda Z_k}{\pi}}, \quad (2.26)$$

$$2\phi_0 = \frac{4\lambda}{\pi d_0}, \quad (2.27)$$

$$2\phi_0 = \frac{2\sqrt{\lambda}}{\sqrt{\pi Z_k}}, \quad (2.28)$$

$$d^2(Z) = d_0^2 + (2\phi_0)^2 Z^2, \quad (2.29)$$

$$R(Z) = Z \left[1 + \left(\frac{Z_k}{Z} \right)^2 \right], \quad (2.30)$$

$$Z_k \approx \frac{d_0}{2\phi_0}. \quad (2.31)$$

Резонаторы, состоящие из плоского и сферического зеркал.

Примеры этих резонаторов показаны на рис. 2.1.8 (полуконфокальный и полусферический резонаторы).

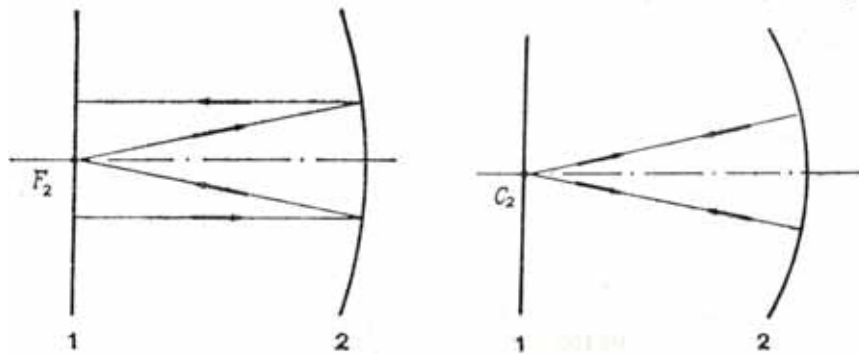


Рис. 2.1.8. Полуконфокальный (слева) и полусферический (справа) резонаторы

На этих же рисунках показаны и замкнутые траектории лучей, полученные в соответствии с геометрической оптикой. Часто используются резонаторы, образованные двумя сферическими зеркалами с одинаковыми радиусами кривизны R . Обычно расстояние L между ними составляет $R < L < 2R$ (т. е. эти резонаторы занимают промежуточное положение между конфокальным и концентрическим резонаторами). Кроме того, можно построить резонатор, у которого $L < R$. Для этих случаев не всегда можно выполнить построение хода лучей.

Неустойчивые резонаторы. Очевидный пример неустойчивого резонатора, когда произвольный луч, последовательно отражаясь от каждого из двух зеркал, удаляется на неограниченно большое расстояние от оси резонатора, приведен на рис. 2.1.9. Неустойчивые резонаторы можно подразделить на два класса: 1) резонаторы положительной ветви, которые соответствуют условию $g_1 \cdot g_2 > 1$; 2) резонаторы отрицательной ветви, которые соответствуют условию $g_1 \cdot g_2 < 0$. Укажем здесь причины, почему эти резонаторы представляют интерес для лазерной техники. В первую очередь подчеркнем, что для устойчивого резонатора, размер пятна в любом случае имеет тот же порядок величины, что и у конфокального резонатора. Отсюда следует, что при длине резонатора порядка метра и для длин волн видимого диапазона размер пятна будет порядка или меньше 1 мм. При таком небольшом сечении моды выходная мощность (или энергия) лазерного излучения, которую можно получить в одной поперечной моде, неизбежно оказывается сильно ограниченной. Наоборот, в неустойчивых резонаторах поле не стремится сосредоточиться вблизи оси (см. рис. 2.1.9), и в режиме одной поперечной моды можно получить большой модовый объем. Однако при работе с неустойчивыми резонаторами возникает другая проблема, связанная с тем, что лучи стремятся покинуть резонатор. Поэтому соответствующие моды имеют значительно большие (геометрические) потери, чем моды устойчивого резонатора (в котором потери обусловлены только дифракцией). Тем не менее, данное обстоятельство можно даже обратить в преимущества, если лучи, которые теряются на выходе из резонатора, включить в полезное выходное излучение лазера.

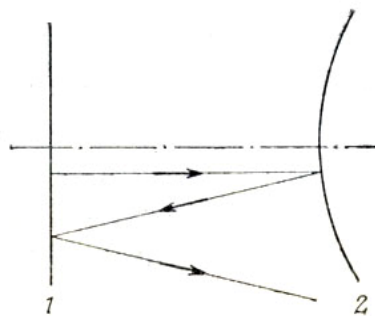


Рис. 2.1.9. Неустойчивый резонатор

В целом, в технологических лазерах чаще всего применяются устойчивые резонаторы или резонаторы, работающие на грани устойчивости (например, плоскопараллельный). Но в некоторых случаях, когда необходимо уменьшить угловую расходимость, используются неустойчивые резонаторы. В неустойчивых резонаторах эффективно подавляются моды высоких порядков при достаточно большой апертуре пучка, хотя они более сложны в юстировке.

Конфокальные неустойчивые резонаторы положительной ветви. Наиболее распространенный тип неустойчивого резонатора (рис. 2.1.10). Излучение из такого резонатора может выводиться с помощью делительной пластинки, за счет частичного пропускания выпуклого зеркала либо, что наиболее часто используется, со стороны выпуклого зеркала (дифракционный вывод излучения), рис. 2.1.10, в. К недостаткам последнего способа следует отнести то, что выходной поток в ближней зоне имеет неоднородное распределение интенсивности в отличие, например, от случая поляризационного вывода излучения.

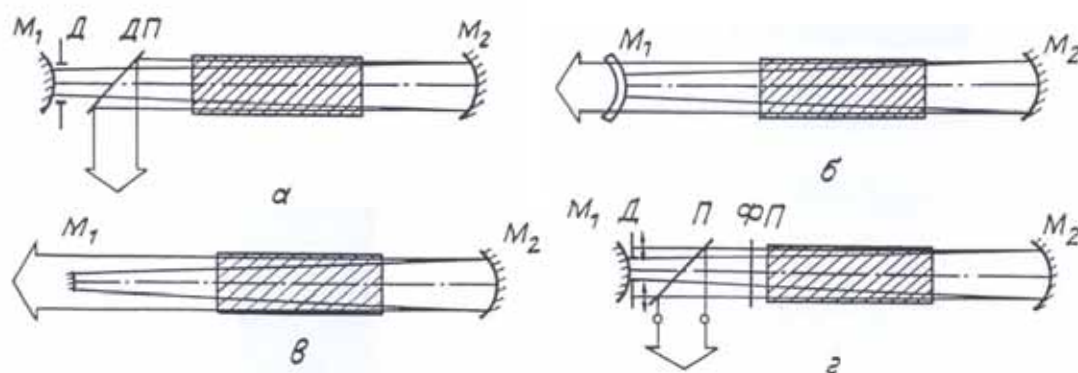


Рис. 2.1.10. Схемы неустойчивого конфокального резонатора положительной ветви устойчивости:

- а – вывод излучения осуществляется с помощью делительной пластинки;
- б – за счет частичного пропускания выпуклого зеркала;
- в – дифракционный вывод; г – поляризационный вывод

При условии насыщения коэффициента усиления активной среды на основной моде резонатора теоретически всегда можно сформировать лазерный пучок с расходимостью, близкой к дифракционному пределу. Однако на практике это условие очень трудно реализовать, поскольку существует целый ряд причин, затрудняющих формирование низших мод резонатора. К основным из них относятся: большой шум усиленных спонтанных потоков, дифракция излучения на оптических элементах с последующим его усилением, искажение волнового фронта пучка на неоднородностях активной среды и оптических элементах. Для эффективного использования НР необходимо соблюдать два основных требования: во-первых, обратная связь, определяемая как $1/M^2$, должна быть достаточной для получения максимальной энергии генерации; во-вторых, M должно быть таким, чтобы позволить низшим модам резонатора стать доминирующими до момента наступления генерации. Необходимое число обходов для формирования мод низшего порядка при этом определяется как

$$n = \ln[2N_F(M-1)]/\ln M. \quad (2.32)$$

При этом эквивалентное число Френеля $N_{эkv}$ определяется как

$$N_{эkv} = (M-1)N_F/2M^2. \quad (2.33)$$

Расходимость выходного излучения после i -го обхода резонатора равна

$$\theta_i = D(1-1/M)/LM^{(i-1)}, \quad (2.34)$$

где D – диаметр выходной апертуры; L – расстояние между зеркалами; увеличение $M = R_1/R_2$ (R_1, R_2 – радиусы кривизны вогнутого и выпуклого зеркал соответственно).

2.1.3.3. Схемы резонаторов для формирования одномодового пучка

Получение пучка на одной поперечной моде возможно несколькими путями:

1. Увеличение длины резонатора L_{omn} до величины

$$L_{omn} \geq \frac{d_0^2}{4\lambda_0}. \quad (2.35)$$

При $d_0 = 6$ мм и $\lambda = 1,06$ мкм длина резонатора должна превышать 10 м, что не реально. Возрастают дифракционные потери при больших абберациях, что ведет к уменьшению мощности (энергии).

2. Установка диафрагмы в резонатор, причем размер диафрагмы не должен превышать $d_0^0 = d_0 \leq 2\sqrt{\lambda_0 L_{omn}}$.

Этот метод достаточно прост, однако влечет за собой значительные потери энергии излучения, поскольку используется только часть объема активной среды. Схема такого резонатора приведена на рис. 2.1.11.

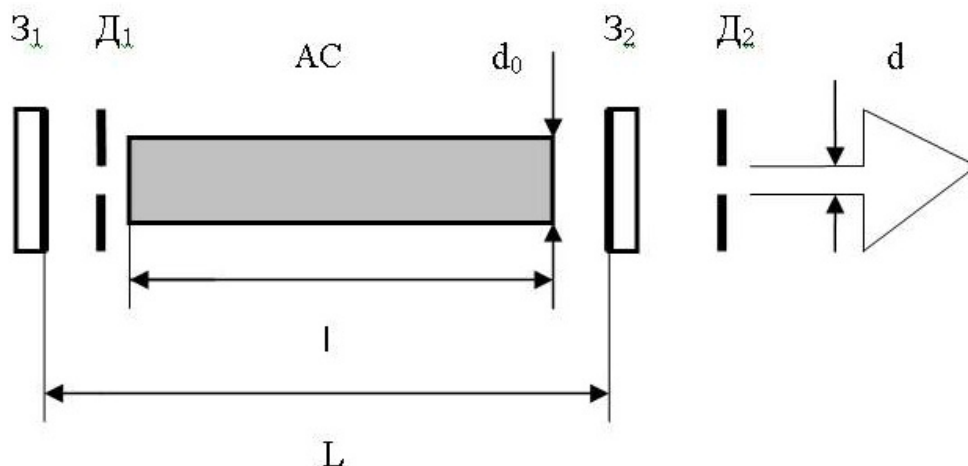


Рис. 2.1.11. Оптическая схема одномодового лазера с плоскими зеркалами

3. Установка в резонаторе телескопа.

Оптическая схема одномодового лазера с телескопом приведена на рис. 2.1.12. Инвариант пучка для однородной среды и высокого качества поверхностей для схем рис. 2.1.11 и рис. 2.1.12 стремится к инварианту дифракционного пучка:

$$I = 2,44\lambda.$$

Схема рис. 2.1.12 предпочтительнее с точки зрения максимального энергосъема с активного элемента (выигрыш порядка в $(m + 1)^2$ раз), однако она более сложна в настройке и требует высокого качества линз телескопа.

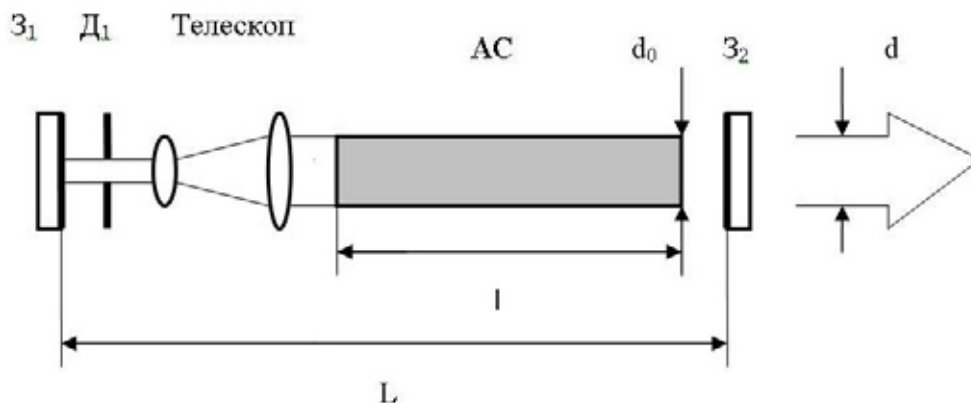


Рис. 2.1.12. Оптическая схема одномодового лазера с плоскими зеркалами и внутрирезонаторным телескопом

Пространственное распределение в ближайшей зоне имеет вид достаточно однородного кружка, в дальней зоне возможно близко к гауссовому:

$$I = I_0 e^{-\frac{(x^2 + y^2)}{r_0^2}} = I_0 e^{-\frac{r^2}{r_0^2}}, \quad (2.36)$$

где r – радиус пучка на расстоянии Z .

Размер ближней зоны для всех случаев

$$Z_0 = \frac{4\lambda_0 L(m+1)}{2,44\lambda_0(m+1)} = \frac{4L}{2,44} \approx 2L, \quad (2.37)$$

$Z_0 \approx 2L$, т. е. не зависит от модовой структуры.

На практике значения $2\varphi_0$ и I_0 значительно больше из-за искажений, вносимых АС (рассеяние на неоднородностях, термические искажения показателя преломления и др.), а величина Z_0 – всегда меньше.

2.1.3.4. Схемы лазеров с модуляцией добротности резонатора

Для получения наносекундного импульса в твердотельном лазере в резонатор устанавливается светозатвор. При этом, в зависимости от типа и параметров затвора, геометрии резонатора и активного элемента, длительность и форма импульса излучения могут несколько различаться. Например, длительность импульса может меняться в пределах от 10 до 50 нс.

Светозатвор может быть пассивным (фототропный) и активным (электрооптический). В первом случае роль затвора сводится к тому, что он вначале перекрывает резонатор (добротность $Q \rightarrow 0$), способст-

вует многократному увеличению инверсной населенности АС. В момент включения затвора (в максимуме инверсной населенности) добротность контура резко возрастает до десятков тысяч единиц. Поэтому процесс излучения идет очень бурный (порядка единиц и десятков наносекунд) с полным опустошением возбужденных уровней.

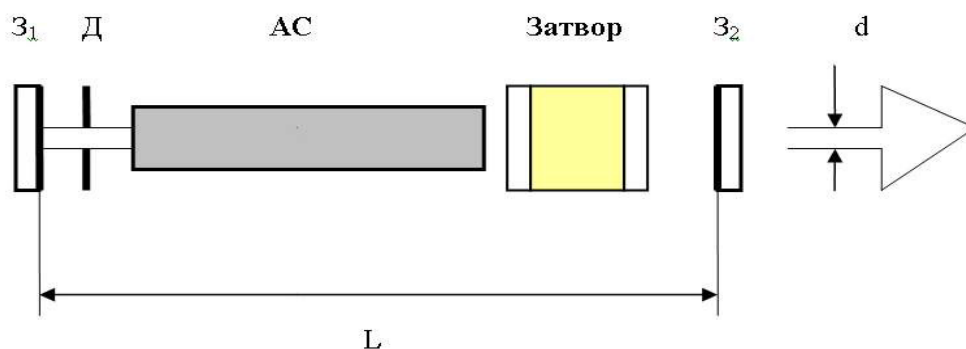


Рис. 2.1.13. Оптическая схема:

$З_1$ и $З_2$ – зеркала резонатора; АС – активная среда лазера;
 Д – диафрагма для селекции поперечных мод

Во втором случае электрооптический затвор выполняет дополнительную функцию синхронизатора мод. Он закрывается и открывается строго в определенный момент через интервал времени, кратный времени обхода резонатора лазерным излучением. При таком включении резонатора продольные моды формируются с одной начальной фазой. Это приводит к формированию цуга коротких импульсов, излучаемых с интервалом времени:

$$T = \frac{2L_{opt}}{c}. \quad (2.38)$$

Длительность короткого импульса обратно пропорциональна полосе частот (ширине спектра) $\Delta\nu$

$$\tau_n = \frac{1}{\Delta\nu} = \frac{1}{\left(\frac{c}{2L}\right)^N} = \frac{2L}{NC} = \frac{T}{N}, \quad (2.39)$$

где N – число продольных мод, τ_n – время когерентности, а $C \cdot \tau_n$ – длина когерентности.

$$l_{ког} = c \cdot \tau_n = 3 \cdot 10^{10} \text{ см/с} \times 10^{-11} \text{ с} = 0,3 \text{ см} \approx 3 \text{ мм}.$$

Таким образом, для получения очень коротких импульсов (пикосекундных и короче) необходима большая полоса частот рабочего перехода, что характерно для лазеров на стекле, на красителях (жидкостные лазеры) и газовых эксимерных лазеров. Так, при $\Delta\nu \sim 10^{11}$ Гц

$$\tau_n \approx 10^{-11} \text{ с}$$

Длительность цуга определяется начальным пропусканием затвора и по порядку величины соответствует τ_n . Поэтому число пучков в импульсе обычно от нескольких единиц до нескольких десятков.

Особенностью схем с модуляцией добротности резонатора является высокая плотность мощности излучения. При этом легко реализуется энергия $W \approx 0,1$ Дж при $\tau_n \sim 10$ нс и $d_0 \sim 1$ мм. Это соответствует плотности мощности на выходе из резонатора $\sim 10^9$ Вт/см². При коэффициенте отражения выходного зеркала $\rho_2 = 0,25$ плотность мощности внутри резонатора может достигнуть

$$q_p \sim 1,25 \cdot 10^9 \text{ Вт/см}^2.$$

При синхронизации мод энергия центрального импульса в цуге импульсов может составлять 10^{-2} Дж. При длительности $\tau_n \sim 10^{-11}$ с плотность мощности $q_p \sim 1,25 \cdot 10^{11}$ Вт/см². При таких высоких плотностях мощности возникает проблема оптической прочности элементной базы лазера, особенно зеркал и просветляющих покрытий.

В случае применения электрооптических затворов излучение обычно поляризовано. Поэтому в оптических схемах можно применять четвертьволновой затвор. Для стабилизации положения плоскости поляризации можно ввести в резонатор необходимое число стеклянных (кварцевых) пластин, расположенных под углом Брюстера.

Ширина линии продольной моды

$$\Delta\nu_z = \frac{1}{\tau_c}, \quad (2.40)$$

где τ_c – время жизни фотона в резонаторе.

Для получения одиночного пикосекундного импульса применяется достаточно простая схема (рис. 2.1.14), которая работает таким образом, что светозатвор открывается на время прохождения одного импульса, как правило, центрального – самого мощного. Очевидно, что лазеры с модуляцией добротности работают в импульсном или импульсно-периодическом режиме.

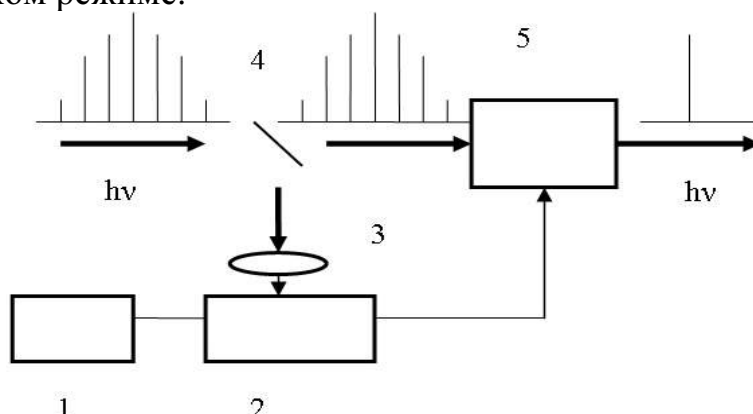


Рис. 2.1.14. Схема выделения пикосекундного импульса:
1 – источник питания и управления затвором; 2 – фотоприемник – ключ;
3 – объектив; 4 – расщепитель пучка; 5 – электрооптический затвор

2.1.3.5. Усиление излучения

Таким образом, из выше описанного следует, что получение в импульсных лазерах высоких значений выходной энергии с высоким качеством излучения (малая расходимость, узкая спектральная линия) весьма затруднительно. При формировании качественного пучка мы неизбежно приходим к существенному снижению мощности (энергии) генерации. Неустойчивые резонаторы позволяют уменьшить расходимость лазерного пучка примерно на порядок величины с примерно двухкратным снижением мощности (энергии) лазера. Однако эта расходимость обычно еще далека от своего дифракционного предела. На практике получение мощных пучков с меньшей расходимостью или узкой линией решается с помощью лазерных систем, состоящих из задающего лазера (задающий генератор – ЗГ) и усилителей. Пример оптической схемы такой лазерной системы (на основе эксимерных лазеров) приведен на рис. 2.1.15. Здесь качественный пучок формируется в ЗГ, расширяется и усиливается на одном проходе в этой же активной среде. Затем, продолжая расширяться, пучок усиливается на двух проходах через два предусилителя и одном проходе через основной усилитель.

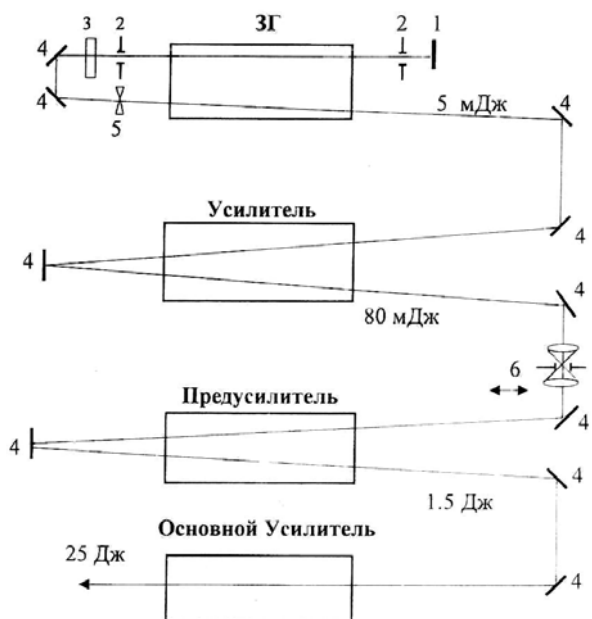


Рис. 2.1.15. Оптическая схема лазерной системы:

- 1, 4 – зеркала полного отражения;
- 2 – диафрагма диаметром 1,5 мм;
- 3 – полупрозрачное зеркало;
- 5 – отрицательная линза с $F = -80$ см;
- 6 – пространственный фильтр на основе телескопа, образованного линзами с фокусными расстояниями 50 и 100 см

Между вторым и третьим усилителями осуществляется фильтрация шумового сигнала от полезного с помощью пространственного фильтра. На рисунке показан типичный уровень энергии излучения после каждого каскада усиления для импульса длительностью 100 нс.

Основное требование к усилителям – увеличение энергетика без ухудшения пространственно-временных и спектральных характеристик.

Усилители представляют собой те же лазеры, но без резонатора. Их накачка производится синхронно с накачкой задающего лазера, но с тем расчетом, чтобы к момен-

ту прихода импульса излучения лазера инверсная населенность АС усилителя была в максимуме. Часто усилители накачиваются раньше лазера, а время задержки накачки задающего генератора зависит от времени жизни возбужденного состояния АС лазера. Усилители могут быть однопроходными или многопроходными. Общее усиление K в активной среде

$$K = I^{gl_{об}}, \quad (2.41)$$

где g – коэффициент усиления АС усилителей; $l_{об}$ – общая длина усилителей.

Например, для неодимового стекла ($g = 0,04 \text{ см}^{-1}$) и длине АЭ квантрона $l_{кв} = 25 \text{ см}$ четыре квантрона дадут усиление $K = I^4 \approx 50$ раз.

Для уменьшения оптической нагрузки и исключения эффекта насыщения по мере усиления пучок обычно расширяется с помощью телескопов. Конечно, в твердотельных усилителях возможны искажения волнового фронта из-за структурных неоднородностей и термонаведенных неоднородностей, однако борьба с искажениями в усилителях проще, чем в задающем лазере. Одним из методов может быть метод обращения волнового фронта (ОВФ). Второй метод – это усиление на дисковых элементах. Преимущество дисковых усилителей – большая апертура, возможность хорошей прокачки и теплоотвода за счет тонких дисков.

Можно ли усиливать импульс безгранично? За счет увеличения поперечных размеров в принципе можно, но технически сложно. За счет увеличения длины – не возможно, поскольку усиленная люминесценция (суперлюминесценция) снижает инверсную населенность. То же делает паразитная генерация. Большой фон может давать усиление света накачки в полосе перехода. И, наконец, насыщение усиления резко снижает его эффективность. Например, для стекла с неодимом в случае инверсной среды с запасенной энергией 1 Дж/см^3 ($g = 0,02 \text{ см}^{-1}$) практически достижимая плотность энергии 300 Дж/см^2 . Поэтому по достижении насыщения нужно увеличивать апертуру пучка и усилительной системы. Необходимо учитывать также и существование порога оптического разрушения (как правило, на выходных торцах активных элементов), а в наносекундном режиме и возможность самофокусировки.

2.1.3.6. Расходимость излучения лазерного пучка

Расходимость лазерного пучка определяется двумя факторами – резонатором и активной средой (АС). Резонатор формирует определенную расходимость пучка, в то время как АС может ее ухудшать за счет присутствия различных неоднородностей (прежде всего в активных средах

лазеров). Главными неоднородностями в твердотельных лазерах являются оптические неоднородности АС, из-за несовершенств материала и термических искажений. Первые приводят к рассеянию излучения на локальных неоднородностях и деформации мод, что приводит к увеличению угловой расходимости излучения. Этот тип неоднородностей сильно различается для различных материалов АС. Второй тип неоднородностей связан с низкой теплопроводностью АС, что приводит к перегреву их центральной части, градиенту показателя преломления и, как следствие, наведенной линзовости. Особенно это характерно для непрерывных лазеров, но так же наблюдается и в импульсном режиме. Экспериментально замечено, что угловая расходимость к концу импульса генерации увеличивается в 2...3 раза. Увеличение $2\varphi_0$ в непрерывных лазерах (и иногда в импульсных) можно частично компенсировать вводом корректирующих элементов, например линз.

Активные среды газовых лазеров наиболее однородны по сравнению с кристаллической структурой твердых материалов (рубин, АИГ и т. д.). Поэтому в них присутствуют существенно меньшие искажения волнового фронта пучка и в газовых лазерах существенно легче получать пучки с малой расходимостью. При этом искажения обусловлены, в основном, неоднородностью накачки (неоднородность разряда).

Кроме искажений за счет неоднородностей, активная среда может увеличивать расходимость пучка за счет формирования мощных потоков усиленного спонтанного излучения (УСИ). УСИ присутствует в лазерном пучке тем в большей степени, чем выше коэффициент усиления АС и больше ее размеры. Особенно велика роль УСИ в импульсных твердотельных лазерах и мощных широкоапертурных эксимерных лазерах.

2.1.3.7. Транспортировка лазерного пучка в свободном пространстве

Поскольку для передачи лазерного пучка на мишень часто приходится проходить определенные расстояния, то на этом пути пучок может иметь некоторые потери. Для уменьшения этих потерь и улучшения условий фокусировки можно использовать телескопическую систему. При этом можно существенно уменьшать расходимость пучка (пропорционально увеличению его диаметра), за счет этого иметь возможность передавать его на большие расстояния и фокусировать в пятно малого размера. На рис. 2.1.16 приведены оптические схемы возможных вариантов передачи пучка в свободном пространстве без телескопа (*а*) и с телескопом (*б*).

При транспортировке пучка в случае (*а*) его размер будет увеличиваться от начального размера (d_0) пропорционально его расходимости ($2\varphi_0$). В случае (*б*) размер пучка увеличивается телескопом в M раз и за-

тем, распространяясь, увеличивается пропорционально меньшей расходимости ($2\varphi_0/M$). Очевидно, что для больших расстояний транспортировка пучка является более выгодной в случае (б). Для иллюстрации рассмотрим пример транспортировки пучка на расстояние 1 км с $2\varphi_0 = 1$ мрад, $d_0 = 1$ см:

а) без увеличения $d(z) = d_0 + Z2\varphi_0 = 1 + 10^{-3} \times 10^5 = 101$ см;

б) при увеличении $M = 10$ $d(z) = Md_0 + Z2\varphi_0/M = 10 + 10^{-3} \times 10^5/10 = 20$ см.

На расстоянии 1 км во втором случае размер пучка будет в 5 раз меньше.

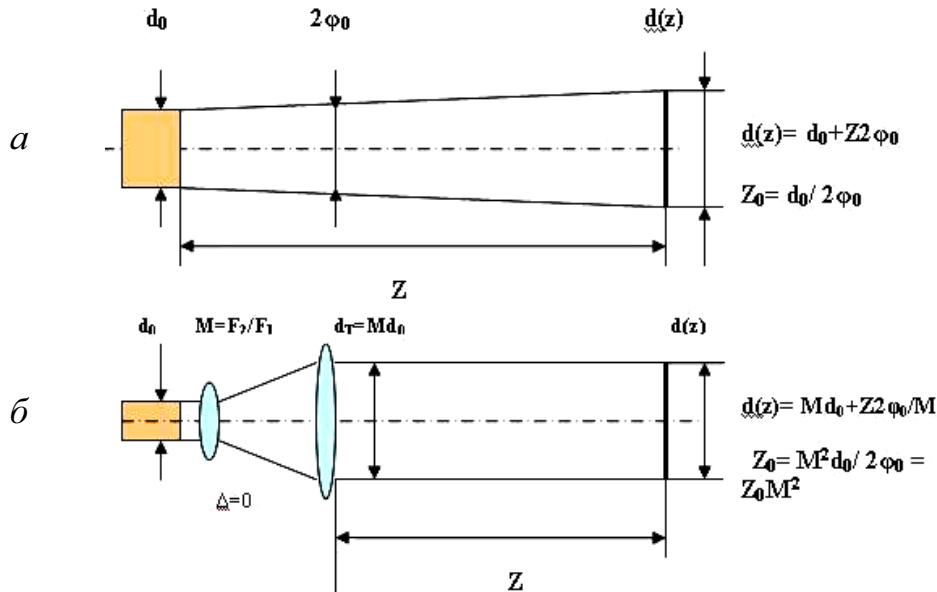


Рис. 2.1.16. Оптические схемы передачи пучка в свободном пространстве: а – без телескопа; б – с телескопом при его нулевой расстройке ($\Delta = 0$)

При использовании телескопа (раздвижка линз) можно обеспечить либо фокусировку пучка, либо транспортировку с образованием фокальной области примерно на половине пути L . При этом минимально достижимые размеры пучка на телескопе D_m и на расстоянии $d(z)$ определяются через инвариант пучка I из соотношения

$$D_m d(z) = IL. \quad (2.42)$$

2.1.3.8. Транспортировка пучка с помощью оптоволоконного тракта

Главным преимуществом транспортировки пучка в световоде является независимость размера пучка от длины тракта и легкость его сканирования по пространственно-угловым координатам. Основными недостатками является сложность в полном согласовании пучка и световода (передача пучка с сохранением энергии и качества) и ограничение по плотности передаваемой энергии (мощности). На рис. 2.1.17 приведена оптическая схема транспортировки излучения по оптоволокну.

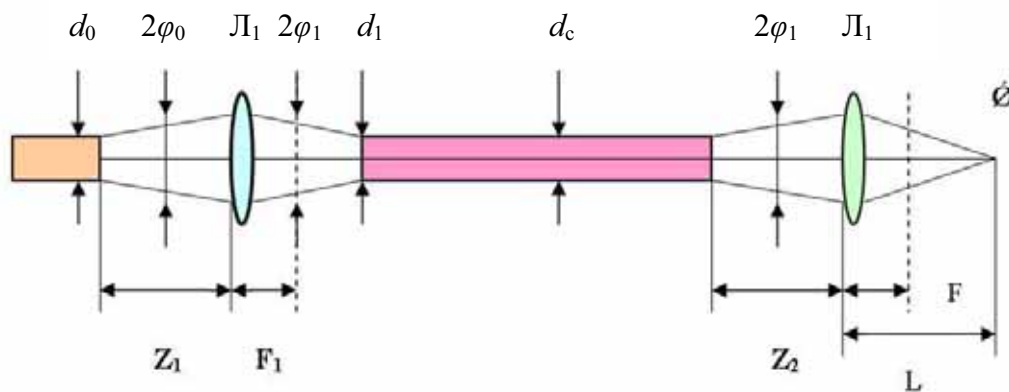


Рис. 2.1.17. Схема транспортировки в оптоволокне с фокусировкой на выходе:

d_0 – первоначальный диаметр пучка; $2\varphi_0$ – расходимость пучка;

L_1 – фокусирующая линза с фокусным расстоянием F ;

$2\varphi_1$ – угол схождения пучка при фокусировке в волокно;

d_1 – размер сфокусированного пучка на входе в световод;

d_c – диаметр сердечника световода;

$2\varphi_1 M$ – угол выхода пучка из световода;

M – угловая передаточная функция $M = M(2\varphi_1)$

Для согласования пучка и световода необходимо, чтобы входной диаметр пучка был меньше диаметра световода и входной угол был достаточно малым, чтобы не возникал режим оболочных мод. Фокусирующая система на выходе световода должна полностью перехватывать пучок и фокусировать его на мишень в оптимальных условиях. На входе в световод должны быть обеспечены минимальные френелевские потери и максимальная оптическая прочность на торце. Условия согласования пучка и световода выглядят следующим образом:

$$d_0 2\varphi_0 = I = d_1 2\varphi_1 \leq d_c 2\varphi_c = d_c 2\varphi_1 M, \quad (2.43)$$

$$d_c \geq d_1,$$

где $2\varphi_c$ – угол, при котором световод пропускает излучение без потерь (нет оболочечных мод); d_1 – размер сфокусированного пучка на входе в световод; $2\varphi_1$ – угол схождения пучка при фокусировке в волокно; d_c – диаметр сердечника световода; $M = 2\varphi_c / 2\varphi_1$ – угловая передаточная функция.

Из условий (2.43) можно рассчитать параметры оптического тракта (диаметр световода d_c), если известен инвариант лазерного пучка $I = d_0 2\varphi_0$ и параметры световода $I_c = d_c 2\varphi_c$. То есть диаметр d_c определяется из условия $d_c \geq I / 2\varphi_c$. Далее нужно выбрать оптическую схему так, чтобы размер пучка d_1 был меньше диаметра световода d_c . Выбор значения $2\varphi_c$ определяется по виду угловой характеристики ввода (УХВ). Эта характеристика определяет пропускную способность световода (I) в зависимости от угла падения луча на его входной торец (рис. 2.1.18).

Угловая передаточная функция M определяется так же из графика зависимости M от угла входа (рис. 2.1.19.). На величину M оказывает влияние относительный радиус изгиба волокна R .

После определения $2\varphi_c$ можно найти относительное отверстие фокусирующего объектива

$$a = 2\text{tg}\varphi_c \quad (2.44)$$

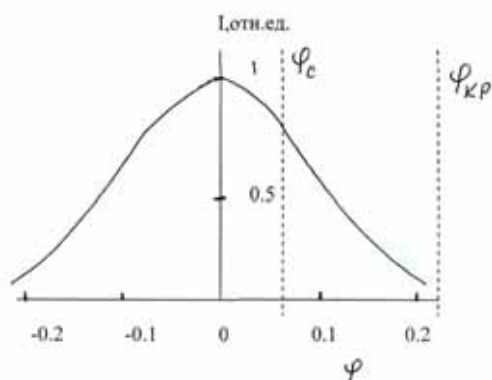


Рис. 2.1.18. Типичная УХВ кварц-полимерного световода для относительного радиуса изгиба $R=1000$ мм

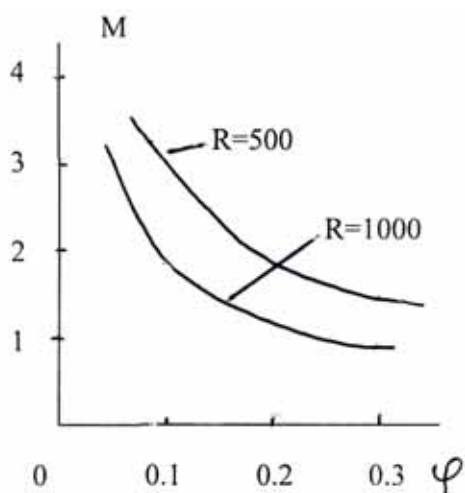


Рис. 2.1.19. Угловая передаточная функция световода для разных R в мм

Выбор положения линзы будет определяться значением d_c и структурой пучка в фокальной плоскости или плоскости изображения. Реальный угол ввода пучка в световод обычно значительно меньше критического угла $\varphi_{кр}$, определяемого числовой апертурой волокна A :

$$A = \sin \varphi_{кр} = \sqrt{n_c^2 - n_o^2}, \quad (2.45)$$

где n_c — показатель преломления сердечника; n_o — показатель преломления оболочки. Числовая апертура для кварц-полимерных волокон составляет величину $A \sim 0,2$.

Возможность перехвата и фокусировка выходного пучка определяется с учетом условия

$$a_1 \geq 2M\text{tg}\varphi_1, \quad (2.46)$$

где a_1 — относительное отверстие первой линзы фокусатора. При этом эта линза может выполнять роль коллимирующей, тогда острота фокусировки за световодом

$$\dot{\varnothing}_{\min} = d_0 2\varphi_0 M / a, \quad (2.47)$$

где a — общее относительное отверстие фокусатора, включая и коллимирующую линзу. При $a = 1$ и $M = 2$ в пределе можно сфокусировать

пучок в размер, численно равный удвоенному инварианту.

По литературным данным через световод с диаметром 1 мм можно передавать более 1 кВт мощности. Пропускная способность ограничивается разрушением торцов световода в результате разогрева, оптического

пробоя, теплового разогрева оболочки, развития ВРМБ и т. д. Кварцевые оптоволоконные тракты в видимой области спектра имеют коэффициент ослабления $K \sim 0,1$ Дб/м (1 Дб ослабляет интенсивность в 1,26 раза).

2.1.3.9. Фокусировка лазерного пучка

Для фокусировки лазерного пучка на деталь могут применяться различные оптические схемы в зависимости от вида технологии. Технологические объективы для фокусировки лазерного излучения могут быть линзовыми и зеркальными. Линзовые объективы применяются при малых размерах пучка. Они имеют высокий порог разрушения и не меняют направление оптической оси. Зеркальные объективы могут иметь большие размеры и обычно применяются для CO₂-лазеров. Объективы для фокусировки имеют ряд особенностей:

1. Большое фокусное расстояние объектива для обеспечения его защиты от паров обрабатываемого материала.
2. Объективы должны перемещаться на большие расстояния (до десятков метров) от лазерного источника. При этом условия фокусировки должны не изменяться.
3. При работе с CO₂-лазером обычно применяется отражательная оптика, что накладывает определенные условия на конструкции объективов.
4. Иногда требуются объективы для обработки сложного профиля поверхности.

На рис. 2.1.20 приведены некоторые схемы фокусировки излучения с помощью различных объективов. При использовании схемы рис. 2.1.20, *а* распределение интенсивности в фокальном пятне не однородно. В схеме рис. 2.1.20, *в* можно получить достаточно однородное пятно. В телескопической схеме (рис. 2.1.20, *б*, *в*) первую линзу выгодно брать рассеивающую. Это позволяет избежать пробоя в ее фокусе при импульсе с высокой мощностью, а также уменьшить aberrации объектива. Для снижения aberrаций телескопа необходимо использовать плоско-вогнутую и плоско-выпуклую линзы с плоскими поверхностями во внутрь объектива.

При расстройке телескопа (раздвижка линз) обеспечивается фокусировка пучка рис. 2.1.20, *в*. При этом размер пучка будет пропорционален расстоянию до эквивалентного фокуса и обратно пропорционален увеличению телескопа. Размер можно выразить через инкремент пучка I , который в какой-то мере ограничивает его размер.

$$d(z) = Z2\varphi_0 / M = Z2\varphi_0 / (D_m / d_0) = Z2\varphi_0 d_0 / D_m = ZI / D_m \quad (2.48)$$

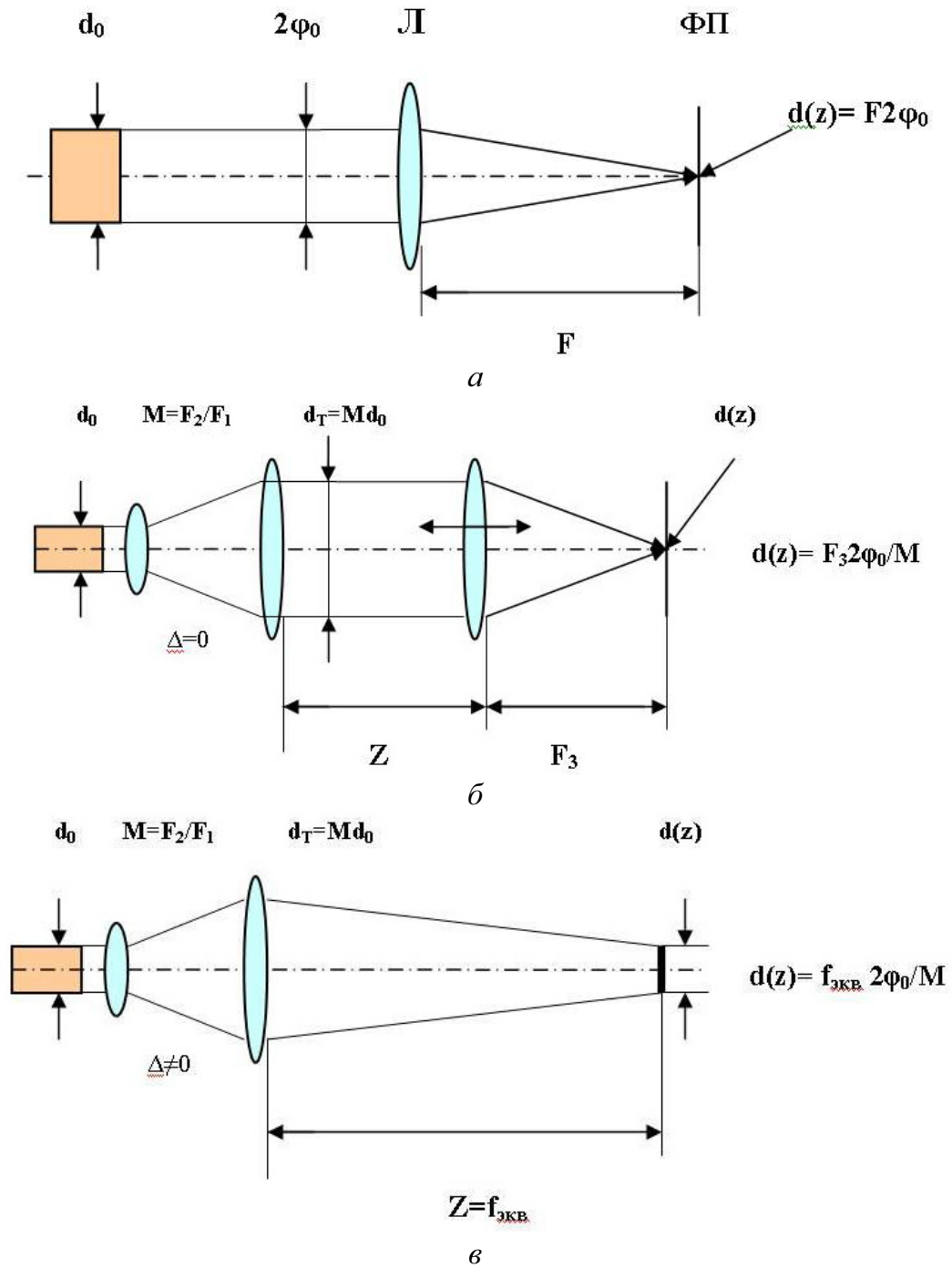


Рис. 2.1.20. Схемы линзовой фокусировки излучения:
 а – фокусировка линзой в фокальной плоскости;
 б – трехлинзовой системой в фокальной плоскости;
 в – линзовым телескопом с его расстройкой

На рис. 2.1.21 приведены схемы фокусировки с помощью зеркал.

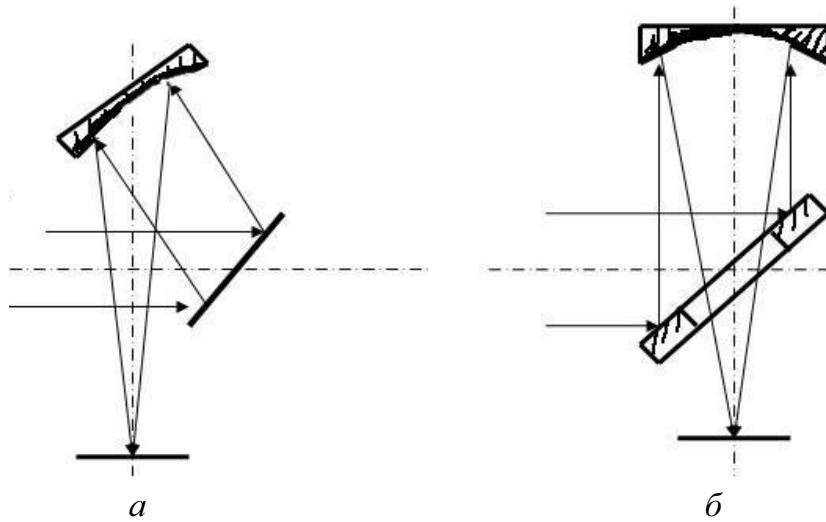


Рис. 2.1.21. Схемы зеркальной фокусировки излучения:
 а – фокусировка со сферическими искажениями,
 б – фокусировка без искажений

На рис. 2.1.22 приведены схемы фокусировки с помощью зеркального телескопа.

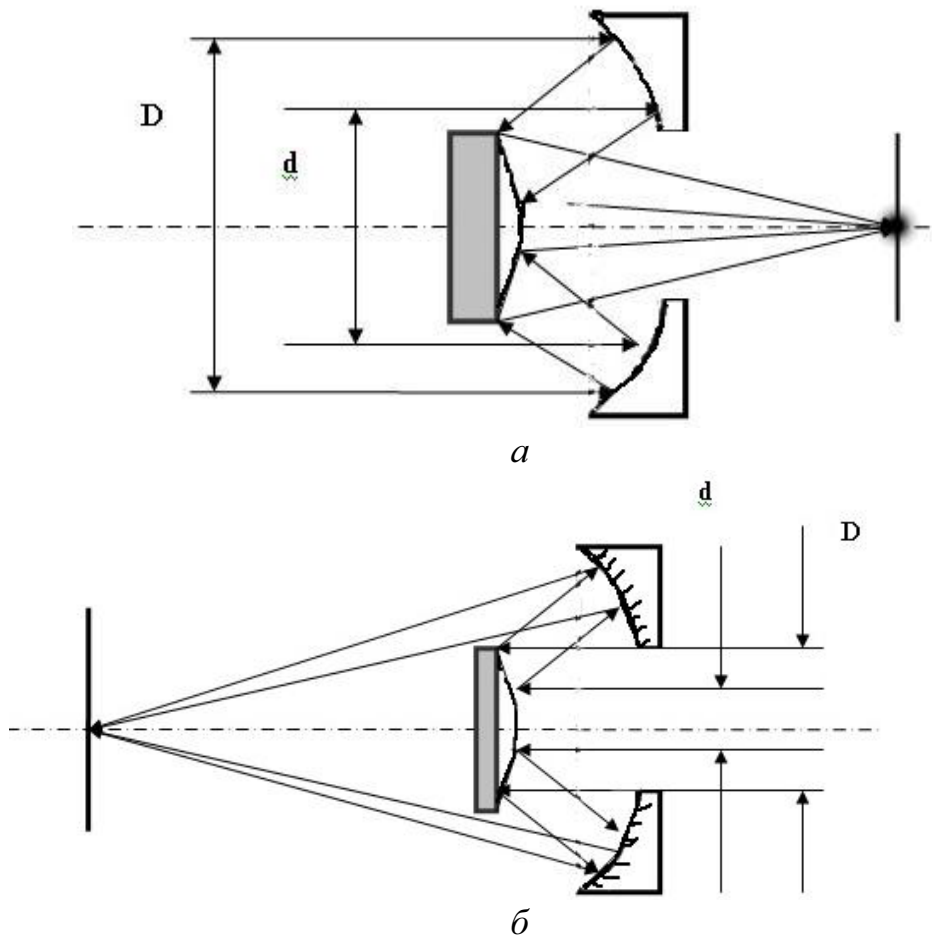


Рис. 2.1.22. Схемы фокусировки излучения классическим (а) и обращенным (б) объективом Кассегрена

Схемы рис. 2.1.21, б и рис. 2.1.22 рассчитаны на кольцевой пучок неустойчивого телескопического резонатора. В схеме рис. 2.1.22 вогнутое зеркало является параболоидальным, а выпуклое – гиперболоидальным.

Во всех схемах фокусировки пучка минимальный его размер ограничивается его инвариантом I .

$$d_{F\min} = 2\varphi_0 F = 2\varphi_0 d_0/a = I/a, \quad (2.49)$$

где $a = d_0/F$ – относительное отверстие. Для минимальных aberrаций величина $a \leq 0,1$, и тогда минимальный диаметр пучка будет в десять раз превышать инвариант I .

$$d_{F\min} = 10 \times I. \quad (2.50)$$

При наличии aberrаций диаметр увеличивается на некую величину $d_{a\delta}$:

$$d_F = 2\varphi_0 d_0/a + d_{a\delta} \quad (2.51)$$

Минимальные сферические aberrации, которые проявляются при острой фокусировке, определяются форм-фактором q :

$$q = (r_1 + r_2)/(r_1 - r_2), \quad (2.52)$$

где r_1 и r_2 – радиусы кривизны первой и второй поверхностей линзы.

Фокусировка в пятно является наиболее простой задачей преобразования пучка. На практике применяются более сложные конфигурации. Иногда требуется создать сфокусированное кольцо для сварки кольцевых швов. Для этого существует аксиконная схема, которая представляет собой сочетание конической и сферической линз (рис. 2.1.23).

Диаметр кольца на детали (3) определяется углом φ и фокусным расстоянием объектива F . Толщина кольца определяется угловой расходимостью падающего пучка. Если пучок уже имеет кольцевую структуру, то в некоторых случаях можно обойтись одной линзой. Аксиальная система удобна для вырубания отверстий большого диаметра в тонких пластинах.

Для обработки поверхности цилиндрических деталей хорошо подходит схема, приведенная на рис. 2.1.24.

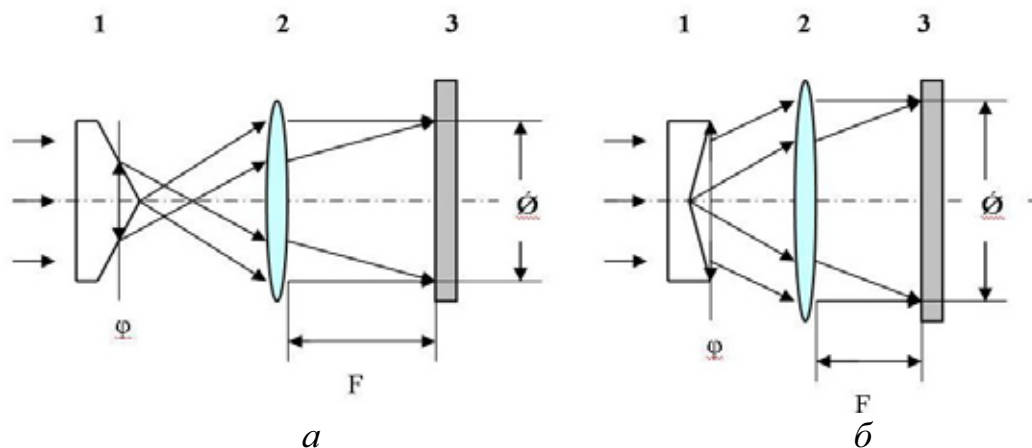


Рис. 2.1.23. Аксиконные схемы фокусировки излучения на деталь:
1 – коническая линза; 2 – сферическая линза; 3 – деталь

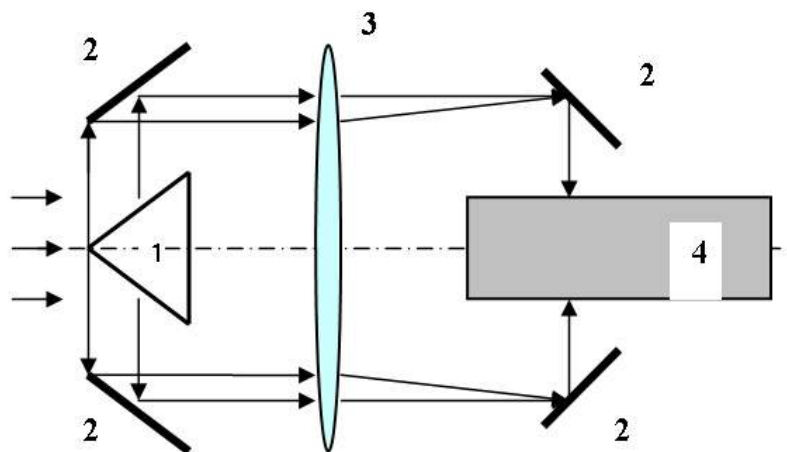


Рис.2.1.24. Оптическая схема фокусировки излучения на цилиндрическую деталь:
 1 – зеркальный конус; 2 – плоские зеркала; 3 – сферическая линза;
 4 – цилиндрическая деталь

Если необходима неоднородная засветка обрабатываемой поверхности, то это позволяет выполнить схема, приведенная на рис. 2.1.25. Для этого в фокусирующей линзе имеется отверстие, через которое часть пучка падает на деталь без фокусировки. Оставшееся излучение, прошедшее линзу, остро фокусируется на поверхность.

Наиболее остро фокусируются дифракционные пучки. Но распределение в фокусе получается неоднородным. Для повышения однородности (а значит и качества обработки) можно использовать проекционную схему (рис. 2.1.26).

В этой схеме строится уменьшенное изображение диафрагмы (маски), вырезающей однородную часть пучка. Маска обычно имеет сложный профиль и освещается коллимированным пучком.

Размер пучка формируется таким образом, чтобы маска не разрушалась. Задача расчета оптической схемы состоит в получении четкого изображения заданного размера, который должен уменьшиться пропорционально увеличению оптической системы M , где

$$M = D_M/D_{И}. \quad (2.53)$$

Обычно увеличение выбирается в некотором диапазоне между максимальным и минимальным значениями:

$$M_{\min} < M < M_{\max}, \quad (2.54)$$

где $M_{\min} = q_1^{0,5}/q_2^{0,5}$; q_1 – рабочая интенсивность излучения в зоне обработки; q_2 – пороговая интенсивность излучения на маске.

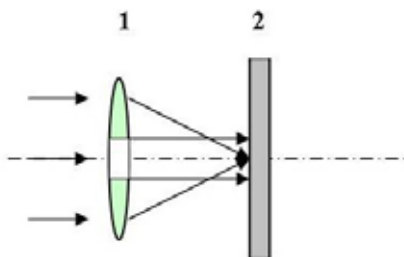


Рис. 2.1.25. Схема фокусировки излучения на деталь через линзу с отверстием:
 1 – линза; 2 – деталь

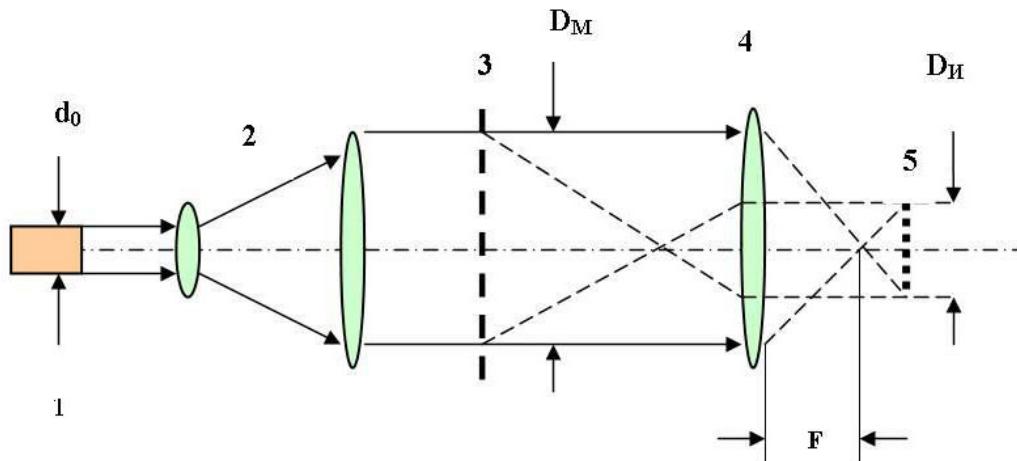


Рис.2.1.26. Проекционная схема для уменьшения изображения маски:
 1 – лазер; 2 – телескоп; 3 – диафрагма; 4 – объектив; 5 – изображение

Величина M_{\max} есть

$$M_{\max} = D_0 d_{\min} / \lambda F, \quad (2.55)$$

где D_0 – апертура пучка на объективе; d_{\min} – минимальный размер щели рисунка маски. Размер щели в изображении будет $d = d_{\min}/M$.

Основным преимуществом проекционной системы является возможность обработки по сложному контуру за один лазерный импульс. При этом возможно получение высокой точности обработки. При достаточно большом увеличении телескопа в качестве маски можно использовать обычные фотодиапозитивы.

2.2. Элементная база ЛТУ, оптика лазерных технологических установок

2.2.1. Зеркала резонаторов

Зеркала резонатора должны иметь малые потери, связанные с поглощением и рассеянием, быть стойкими к мощному излучению, механическим воздействиям (чистке), иметь высокий коэффициент отражения. Иногда требуются широкополосные или узкополосные зеркала. Обычно зеркала крепятся в юстируемых оправках. В случае разогрева зеркал при действии мощных потоков они должны охлаждаться. В некоторых случаях необходимо охлаждение юстировочных узлов во избежание разъюстировки резонатора.

Зеркала могут быть металлическими, с металлическими отражающими покрытиями на металлических или диэлектрических подложках и диэлектрическими покрытиями на диэлектрических прозрачных подложках.

Зеркала металлические (массивные) и с металлическими покрытиями обладают значительным остаточным поглощением, но высокой теплопроводностью. Поглощение излучения зависит от длины волны и для различных металлов различно. Чем выше удельная электрическая проводимость, тем меньше поглощение. Распределение света по глубине металла:

$$I(Z) = A \cdot I_0 \exp^{(-\mu Z)}, \quad (2.56)$$

где A – поглощательная способность ($A = 1 - \rho$, где ρ – коэффициент отражения); μ – показатель поглощения.

$$\rho = \frac{(n-1)^2 + n^2 x^2}{(n+1)^2 + n^2 x^2}, \quad (2.57)$$

где n – показатель преломления; $x = \frac{\mu}{2k}$ – коэффициент экстинкции.

Коэффициент отражения ρ для некоторых металлов приведен в табл. 1 для излучения основных лазеров.

Таблица 1

Тип лазера		ρ						
АЭ	λ , мкм	Al	Cr	Cu	Ag	Au	Ni	сталь
Ar	0,488		0,437		0,95	0,415	0,597	
$Al_2O_3 + Cr^{3+}$	0,694	0,97	0,831	0,82	0,96	0,930	0,676	0,58
YAG + Nd^{3+}	1,064	0,93	0,901	0,91	0,97	0,981	0,741	0,63
CO ₂	10,600	0,97	0,984	0,98	0,99	0,975	0,942	0,93

Из (2.56) видно, что остаточное поглощение распределено в тонком слое $\frac{1}{\mu}$ – порядка длины волны λ . Поэтому при мощных световых потоках возможен перегрев и разрушение слоя. Кроме того, металлические слои, нанесенные на диэлектрическую подложку, механически не прочны и требуют защиты диэлектрической пленкой. Такие зеркала могут применяться в маломощных ТЛ.

Металлические зеркала (металлическая подложка + тонкий слой Me) могут применяться в мощных ТЛ в непрерывном режиме излучения и, в некоторых случаях, в импульсном режиме. Например, охлаждаемые зеркала из суперполированной меди выдерживают (с охлаждением) до 200 кВт/см² в непрерывном режиме. Перспективны зеркала с отражающим слоем никеля на медной подложке. Зеркала из Be + Cu могут рабо-

тать при импульсном воздействии с плотностью энергии до 100 Дж/см^2 . В таких зеркалах медь обеспечивает хороший теплоотвод, а тугоплавкое покрытие обеспечивает высокое отражение. Зеркала из чистой меди могут покрываться диэлектрическим слоем для защиты поверхности от окисления.

Зеркала с диэлектрическим покрытием на диэлектрических подложках получают путем нанесения на подложку чередующихся слоев с высоким и низким показателем преломления. Они обладают почти 100 %-м отражением при поглощении порядка долей процента. В видимой области спектра в качестве подложек используют стекло или кварц, а в качестве напыляемых слоев ZnS (высокий n) и MgF_2 (низкий n). Важным при изготовлении хороших зеркал является чистота обработки рабочей поверхности подложки. Ее доводят до плоскостности порядка $\lambda/10$ и менее.

Такие зеркала могут работать при импульсных режимах облучения в наносекундном и пикосекундном диапазонах. Их оптическая прочность может достигать в наносекундном режиме 1 Дж/см^2 и 100 МВт/см^2 . При превышении пороговой интенсивности зеркала разрушаются, при этом напыленный слой или выгорает или отслаивается от подложки. В режиме свободной генерации при большой длительности импульса пороговая плотность энергии H_0 может достигать $H_0 \geq 1000 \text{ Дж/см}^2$

В инфракрасной области спектра выбор подложки определяется прозрачностью материала и его показателем преломления. Подходящих для этих целей материалов не много. В ряде случаев в качестве зеркала может использоваться граница раздела, т. е. чистая поверхность (благодаря высокому значению n). По этой же причине иногда поверхность, не покрытую отражающим слоем необходимо просветлять. Многие из материалов гигроскопичны и обладают значительным коэффициентом поглощения, механически прочны. В ТЛ для ИК-области находят применение следующие материалы:

- группа ЩГК (ионные кристаллы) – NaCl , KBr , КРС-5, КРС-6;
- группа полупроводниковых кристаллов – ZnSe , GaAs , Ge .

Первая группа характеризуется малыми значениями показателя преломления n , малым коэффициентом поглощения, низкой прочностью, низкой теплопроводностью, большой гигроскопичностью.

Вторая группа характеризуется высоким n , высокой λ_m , высоким коэффициентом поглощения, высокой механической прочностью. Они не прозрачны в видимой области спектра. Технические характеристики материалов даны в табл. 2.

Таблица 2

Параметр	NaCl	ZnSe	GaAs	Ge	алмаз	Примечание
n	1,46	2,4	3,3	4,0	2,41	$\lambda = 10,6$ мкм
ρ , %	3,8	17	25	36	17	Непокрытая поверхность
Коэффициент поглощения, %/см	0,2	0,5	2	2	0,01	% на 1 см толщины
Диапазон пропускания, мкм	0,25...16	0,5...20	1...18	2...18	0,2...2>6	

Графики пропускания от длины волны приведены на рис. 2.2.1.

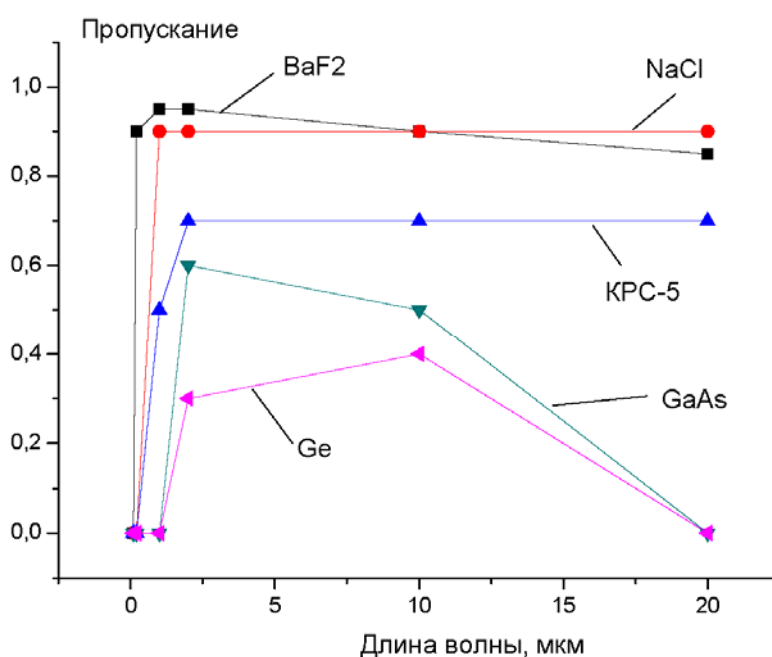


Рис. 2.2.1. Пропускания различных материалов в ИК-области спектра в зависимости от длины волны

Перечисленные материалы применяются в CO_2 -лазерах и не только в качестве подложек зеркал, но и в других элементах (линзы, диафрагмы, окна). Оптическая прочность в микросекундном интервале $0,1 \dots 10$ МВт/см².

Необходимо отметить, что в качестве глухих зеркал могут быть использованы призмы полного внутреннего отражения (оборотные призмы).

2.2.2. Линзы, выходные окна, делительные пластины

В оптических схемах лазеров линзы употребляются для коррекции тепловых искажений, в телескопических системах – для фильтрации мод высших порядков и для фокусировки пучка на мишень. Выходные окна и делительные пластины используются в оптических схемах лазе-

ров. Требования к материалу этих элементов те же, что и требования к любым элементам проходной оптики:

- минимальное изменение показателя n от температуры;
- прозрачность на данной длине волны;
- высокая оптическая прочность, обеспечивающая требуемый порог поверхностного и объемного разрушения и обеспечивающая ресурс работы;
- высокая механическая твердость, обеспечивающая качественную обработку поверхностей;
- высокая теплопроводность;
- невысокая стоимость сырья и материала;
- малый коэффициент поглощения.

Материалов, полностью удовлетворяющих этим требованиям одновременно в видимой, УФ- и ИК-областях спектра еще нет. Кроме, разве что алмаза или лейкосапфира (Al_2O_3), но последний прозрачен до 4 мкм. Например:

- КРС-5 и КРС-6 (КРС-5 – это $TlBr + TlI$, а КРС-6 – это $TlBr + TlCl$) имеют малую термостойкость и являются токсичными;
- Ge, GaAs, CdTe – непрозрачны для видимого света, что затрудняет сборку и юстировку;
- NaCl, KCl, KBr, LiF – гигроскопичны и мягкие для полировки;
- ZnSe, BaF₂, CdTe – имеют высокую стоимость;
- Ge – имеет резкий нелинейный рост поглощения при температуре выше 300К.

Критерием применимости того или иного материала служит средняя мощность, при которой отсутствуют разрушения или избыточные неприемлемые искажения пучка. Порог оптической прочности – это значение плотности потока, которую выдерживает неохлаждаемый элемент в течение времени установления стационарного температурного поля. В видимой области спектра применяется оптика из стекла и кварца. Для CO₂-лазеров в простых схемах, где не требуется пилотный луч, применяются материалы из Ge и ZnSe, причем Ge – в лазерах низкой мощности. Там, где требуется юстировочный луч He-Ne-лазера, можно применять материалы из KBr, КРС-5. В эксимерных лазерах применяется плавленый кварц, CaF₂, MgF₂.

Аберрационные искажения пучка, вносимые проходной оптикой, желательно иметь минимальными. Для одиночных линз минимальные аберрации достигаются путем подбора конфигурации, которая для материалов с различным показателем преломления n различна. Диаметр аберрационного пятна в фокусе линзы определяется по формуле:

$$\varnothing_{аб} = \frac{p \cdot d^3}{32F^2}, \quad (2.58)$$

где p – собственный абберационный параметр линзы; d – размер пучка на линзе; F – фокусное расстояние линзы.

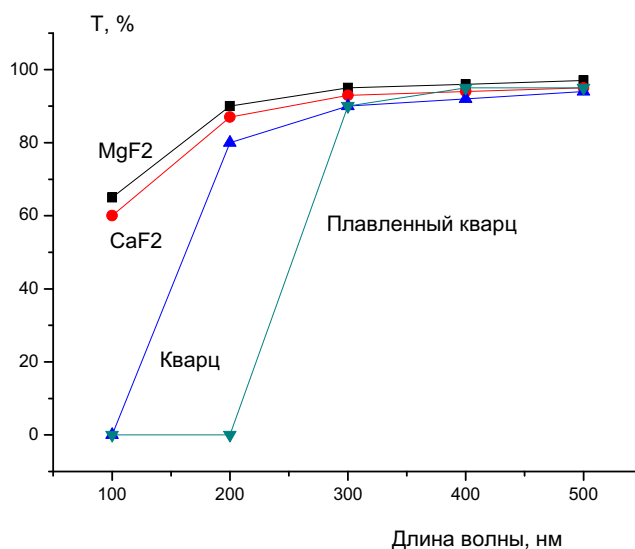


Рис. 2.2.2. Пропускания различных материалов в УФ-области спектра в зависимости от длины волны

Выражение (2.58) можно преобразовать к более удобному виду:

$$\varnothing_{об} = \frac{P \cdot d^3}{32F^2} \cdot \frac{F}{F} = \frac{P \cdot d^3}{32F^3} \cdot F = \frac{P \cdot a^3 \cdot F}{32}, \quad (2.59)$$

где a – относительное отверстие линзы при полном заполнении апертуры пучком или отношение размера пучка на линзе к ее фокусному расстоянию при неполном заполнении (удвоенный тангенс угла схода лучей).

Параметр p минимален для следующих конфигураций:

- для линз из хлористого натрия ($n \approx 1,45$) при двояковыпуклой конфигурации поверхностей с неравными радиусами кривизны и установкой более выпуклой стороной к лучу;
- для линз из стекла и кварца ($n \approx 1,5$) при плосковыпуклой конфигурации с выпуклой стороной к пучку;
- для линз из германия, селенида цинка, арсенида галлия ($n > 2,0$) лучше выпукло-вогнутые, конфигурации (мениски) с установкой выпуклой стороной к лучу.

В телескопических системах, установленных внутри резонатора, обычно располагается не менее двух линз. В этом случае подбором aberrации одной линзы можно компенсировать aberrации другой линзы, если знаки aberrаций противоположны. Так, для неодимовых лазеров оптимальна плоско-выпуклая конфигурация линз телескопа из стек-

ла с расположением, показанным на рисунке 2.2.3, т. е. плоскими поверхностями вовнутрь телескопа.

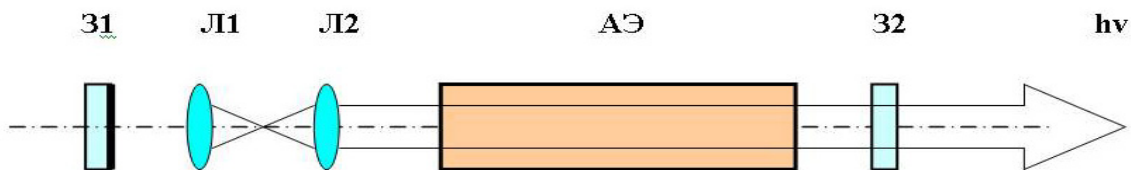


Рис.2.2.3. Конфигурации линз в резонаторе

Поверхности линз должны быть просветлены на длине волны генерации. В противном случае возможны большие потери с одновременным ухудшением качества пучка.

2.2.3. Диафрагмы

Диафрагмы в схемах лазеров чаще всего применяются для селекции угловых мод. При малых плотностях потока излучения в резонаторе ($I < 10^5 \text{ Вт/см}^2$) диафрагмы могут иметь простейшую конструкцию – в непрозрачном материале (например, металле) изготавливается отверстие нужного диаметра d_0 . Обычно это достаточно тонкая пластинка из хорошо поглощающего материала. Однако при высоких плотностях потока возможен пробой на краях отверстия, появление плазмы и экранировка пучка. В этом случае целесообразнее применять диафрагмы из прозрачного диэлектрика для волны излучения (рис. 18, б). Здесь пучок с размером, большим d_0 испытывает полное внутреннее отражение и выбрасывается из резонатора. Основное требование к материалу диафрагмы – высокая оптическая прочность. В принципе возможно применение непрозрачных диэлектриков, например ПММК (оргстекла), или «мягких диафрагм» с переменным (возрастающим) коэффициентом отражения от края отверстия.

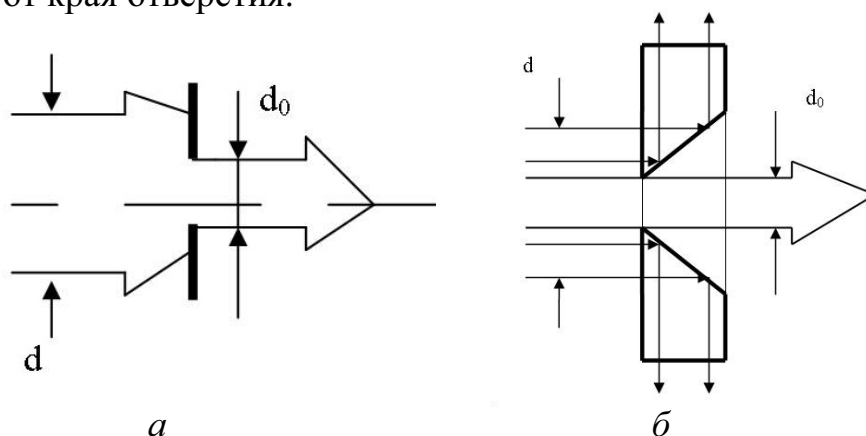


Рис. 2.2.4. Конфигурации диафрагм:

а – жесткая металлическая диафрагма; б – диэлектрическая прозрачная диафрагма

2.2.4. Оптические затворы

В ТЛ используются преимущественно электрооптические и акустооптические затворы, реже применяют фототропные затворы. Конструкция фототропного затвора отличается исключительной простотой – это или раствор красителя, помещенный в стеклянную (кварцевую) кювету, или пластинка кристалла с поглощающими F-центрами, например кристалл LiF (рис. 2.2.5).

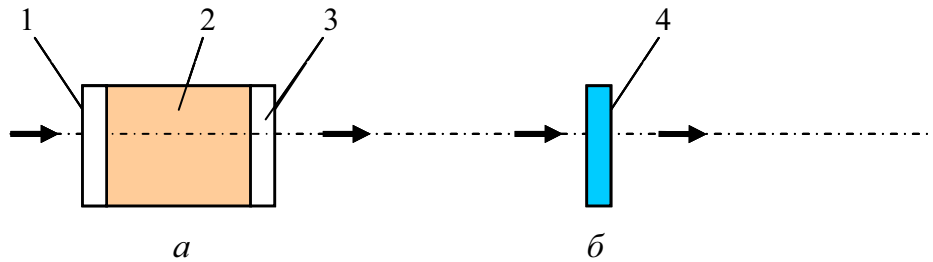


Рис. 2.2.5. Пассивные (фототропные) затворы:
а – кювета с раствором красителя; б – кристалл с F-центрами;
1 – кварцевые окна; 2 – втулка; 3 – раствор

Желательно иметь плоскопараллельность рабочих плоскостей, соответствующую типу резонатора. Для неодимовых лазеров употребляют растворы номерных красителей (№ 3955 или № 3472) в нитробензоле или изобутиловом спирте.

Начальное пропускание $\sim 25\%$, время включения $\sim 10^{-9}$ с, $\tau_n \sim 2 \cdot 10^{-8}$ с, краситель – № 3955 с большим временем релаксации. При синхронизации мод используют краситель № 3472 – с малым временем релаксации. Затвор совмещают с задним зеркалом для повышения глубины модуляции. Недостаток пассивных (фототропных) затворов – малая частота следования импульсов. Оптическая прочность таких затворов достаточно высока.

Акустооптические затворы могут работать с частотой до 50 кГц. Как правило, они применяются в лазерах непрерывного действия. На рис. 2.2.6 затвор работает на снятие напряжения, т. е. он открывается в прямом направлении при выключенном питании. Оптическая прочность затвора высока.

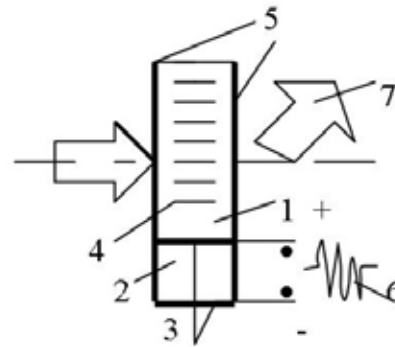


Рис. 2.2.6. Акустооптический затвор:
1 – кварцевая пластина;
2 – пьезоэлемент; 3 – электроды;
4 – акустическая решетка;
5 – просветляющее покрытие;
6 – электрический управляющий сигнал;
7 – отклоненный луч

Акустооптические затворы находят применение в ТЛ, предназначенных для маркировки, резки и сварки.

Электрооптические затворы (ЭОЗ) используются в схемах с импульсно-периодической накачкой лазера при частотах до сотен герц. При импульсных накачках коэффициент усиления АС велик (у АИГ $g \sim 0,5 \dots 0,8 \text{ см}^{-1}$). Он на порядок превосходит g при непрерывной накачке ($g \sim 0,5 \dots 0,1 \text{ см}^{-1}$).

Электрооптические затворы (ЭОЗ) состоят из поляризаторов и управляющих поляризацией элементов. Поляризаторы могут быть двух типов:

1. Границы раздела сред, расположенные под углом Брюстера. Это или срезы на элементах оптики резонатора или стопа плоскопараллельных (п/п) пластин. Недостаток – необходимо иметь много элементов. Преимущество – простота, дешевизна, высокая оптическая прочность.

2. Поляризационные призмы.

Работа поляризатора показана на рис. 2.2.7.

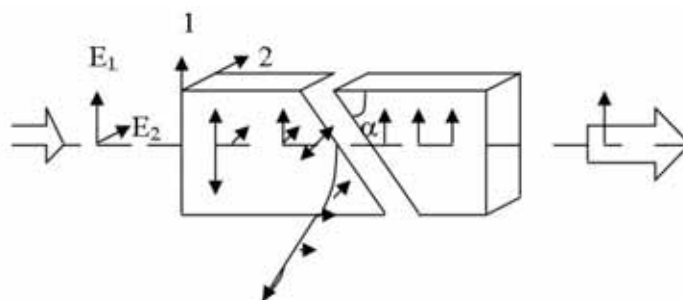


Рис. 2.2.7. Поляризационная призма

Показатель преломления для направлений 1 и 2 различен. Угол α подбирается таким, чтобы полное внутреннее отражение выполнялось для направления вектора 2. В проходящем пучке достигается 100 %-я поляризация. Вторая призма компенсационная.

Материалы для призм:

- исландский шпат ($n = 1,64$) имеет высокий показатель двулучепреломления, прозрачен от ультрафиолета до 3 мкм;
- кристаллический кварц ($n = 1,53$) прозрачен от ультрафиолета до 2 мкм, показатель двулучепреломления на порядок ниже, чем у исландского шпата, нерастворим в воде;
- сульфид кадмия (CdS), ($n = 2,33$) прозрачен от 0,5 до 15 мкм.

Используются также призмы MgF_2 и ниобата лития соответственно для области спектра от УФ до 9 мкм и 5,5 мкм.

Конструкция управляющего поляризацией элемента показана на рис. 2.2.8.

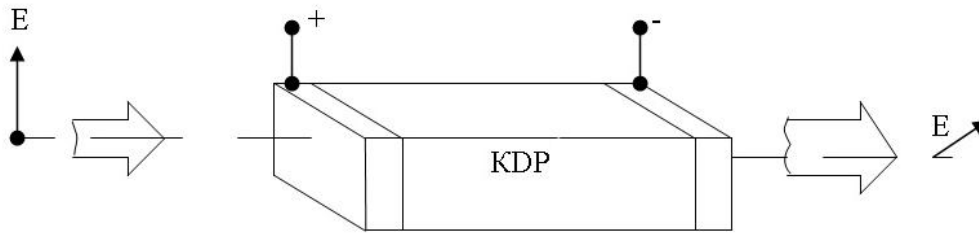


Рис. 2.2.8. Управляющий полуволновой элемент на продольном электрооптическом эффекте

При приложении электрического поля к кристаллу КДР вектор поляризации проходящего излучения обычно поворачивается на 90° . Угол поворота поляризации зависит от приложенного напряжения. Для поворота плоскости поляризации на 90° к кристаллу требуется приложить напряжение примерно в два раза выше, чем для поворота на 45° . Кроме этого величина напряжения зависит от λ (для $\lambda = 1,06$ мкм составляет $10 \dots 12$ кВ). Поэтому на практике чаще используют четвертьволновые затворы, требующие меньше напряжения и работающие в резонаторе на его снятии (при поданном напряжении на КДР излучение выводится поляризатором из резонатора после двух проходов через кристалл). Для получения короткого импульса на одном проходе используют полуволновой затвор (рис. 2.2.9).

Материалы для управляющих (электрооптических) элементов относятся к группе синтетических монокристаллов типа $\text{XН}_2\text{РO}_4$. Требования к таким материалам:

- высокий электрооптический коэффициент;
- высокая оптическая прочность и оптическая однородность.

Применение нашли ячейки из дигидрофосфата калия и аммония (КДР- $\text{КН}_2\text{РO}_4$ и АДР- $\text{NH}_4\text{Н}_2\text{РO}_4$), а также дейтерированные КДР и АДР (ДКДР и ДАДР). Поскольку кристаллы гигроскопичны, их поверхность обычно покрывают тонким защитным слоем. Дейтерированные кристаллы прозрачны до 2 мкм, недеийтерированные – до 1 мкм. Перспективно применение кристаллов из ниобата лития (LiNbO_3), но технология их получения сложна и оптическая прочность таких элементов низка – порядка нескольких десятков МВт/см^2 .

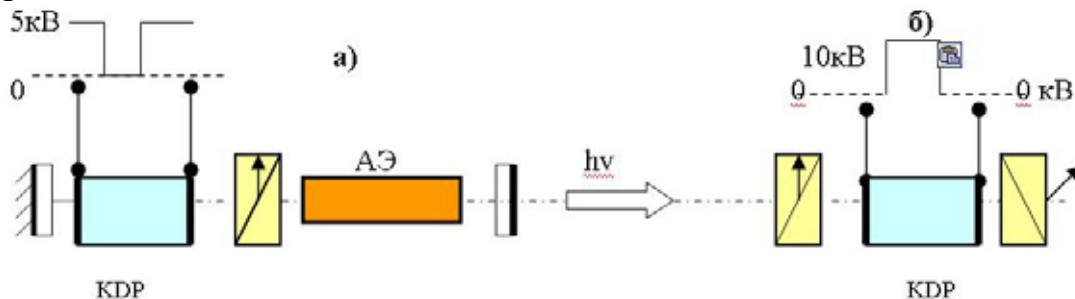


Рис. 2.2.9. Оптические схемы затворов: четвертьволновой внутрирезонаторный затвор (а), полуволновой проходной затвор для обрезания импульса (б)

2.2.5. Спектральные селекторы

Для селекции спектра необходимо использовать дисперсионные элементы. К таким элементам относятся дифракционные решетки, призмы, эталоны. Простейшие селекторы продольных мод – это интерферометры Фабри–Перо, образующие связанный резонатор и состоящие из плоскопараллельных пластин. Требования к таким пластинам:

- прозрачность на рабочей длине волны λ ;
- высокая оптическая прочность;
- показатель преломления n , соответствующий для обеспечения нужного коэффициента отражения.

Если n велико (что характерно для Ge, ZnSe, GaAs), то необходимо просветление поверхности, если n мало – напыление отражающего покрытия. В видимой области спектра и в неодимовых лазерах используются п/п – стеклянные (кварцевые) пластинки. Точность юстировки пластин должна соответствовать точности юстировки зеркал резонатора. В эксимерных лазерах используют дифракционные решетки и твердотельные или воздушные эталоны с диэлектрическим напылением полупрозрачного зеркального отражения.

Раздел 3

ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРОВ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ И УСТРОЙСТВАХ

3.1. Технология лазерной закалки различных материалов

Для того чтобы произошла закалка материала, необходимо его нагреть до определенной температуры, сделать некоторую выдержку, а затем быстро охладить. Во время нагрева и остывания происходит перестройка кристаллической структуры материала и повышается его твердость и хрупкость. Это приводит к повышению износостойкости материала.

Особенностью лазерной закалки являются малые времена нагрева и остывания (высокие скорости процессов). Так скорость нагрева и остывания достигает 10^6 град/с. Вторая особенность заключается в малой толщине слоя закалки $z_{зак}$, толщиной которой можно управлять в широких пределах, меняя интенсивность излучения I_0 и длительность воздействия τ . Величина $z_{зак}$ приближенно оценивается как

$$z_{зак} \sim 2(\acute{\alpha}\tau)^{-0,5}, \quad (3.1)$$

где $\acute{\alpha}$ – коэффициент температуропроводности ($\text{см}^2/\text{с}$). Данный коэффициент определяет, с какой скоростью в материале происходит передача тепловой энергии. Понятно, что с ростом интенсивности глубина закалки растет. При этом вся деталь остается незакаленной и пластичной, и только поверхностный слой становится твердым. При обычных способах закалки это сделать не удастся. Закалка может проводиться как в режиме непрерывного излучения, так и в импульсно-периодическом. В первом случае время воздействия

$$\tau = d_n/v, \quad (3.2)$$

где d_n – диаметр пучка на детали; v – скорость движения пучка по поверхности детали. Для второго случая время воздействия равно длительности лазерного импульса. Температуру поверхностного слоя металла можно оценить как

$$T_{пов} = T_{зак} = 2I_0A(\acute{\alpha}\tau)^{-0,5}/\lambda_T(\pi)^{0,5}, \quad (3.3)$$

где A – коэффициент поглощения излучения; λ_T – коэффициент теплопроводности материала, который связан с коэффициентом температуропроводности $\acute{\alpha}$:

$$\lambda_T = \acute{\alpha}C\rho, \quad (3.4)$$

где C – удельная теплоемкость материала; ρ – плотность материала.

Для увеличения коэффициента поглощения A используют наносимые на поверхность поглощающие покрытия. Широкое применение нашли:

- химические покрытия (оксидирование, сульфидирование, фосфатирование);
- красящие составы, содержащие ZnO, Al_2O_3 ;
- копчение (сажа);
- раствор углерода в ацетоне и спирте.

Покрытия должны прочно удерживаться на поверхности, хорошо передавать тепло, иметь высокое значение коэффициента A . Для хороших покрытий величина A достигает 80 %.

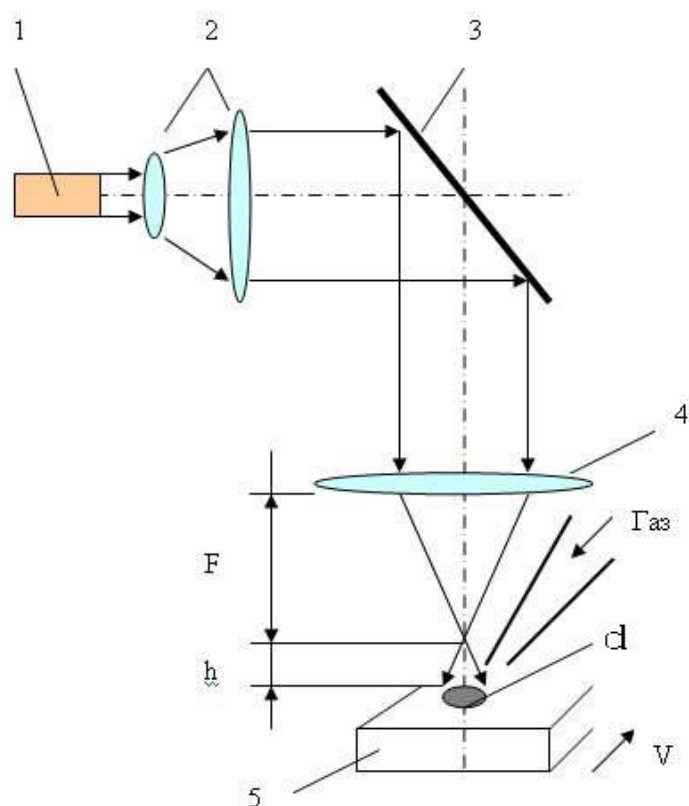


Рис. 3.1. Схема ЛТУ для лазерной закалки:

1 – лазер; 2 – телескоп; 3 – поворотное зеркало; 4 – фокусирующий объектив;
5 – обрабатываемая деталь; V – скорость перемещения детали, d – диаметр пятна

На рис. 3.1 приведена оптическая схема ЛТУ для лазерной закалки при обработке лазером непрерывного действия с использованием манипулятора изделия. Для обработки габаритных деталей предпочтительней использовать манипулятор оптики. Если лазер импульсно-периодический, то необходимо частоту следования импульсов согласо-

вать со скоростью обработки V с тем расчетом, что облученные участки должны частично накрывать друг друга. В случае однородной засветки деталь перемещается сначала по одной координате, а затем по другой, за время обработки со скоростью V на расстояние, равное диаметру пятна d (3.2). При гауссовом распределении интенсивности по пятну необходимо перекрытие полос по разным координатам. Величина пятна определяется из соотношения

$$d = d_0 h / F, \quad (3.5)$$

где d_0 – размер пучка на линзе объектива.

Поток газа, который направляется соплом на поверхность (вдоль каустики пучка), предназначен для защиты поверхности от окисления. Это какой-нибудь из инертных газов (гелий, аргон), азот или CO_2 .

Очевидно, что чем меньше скорость обработки V и больше значение $I_0 A$, тем больше глубина заковки $Z_{\text{зак}}$. При обработке лазером непрерывного действия $Z_{\text{зак}}$ как правило больше, чем при обработке импульсно-периодическим лазером.

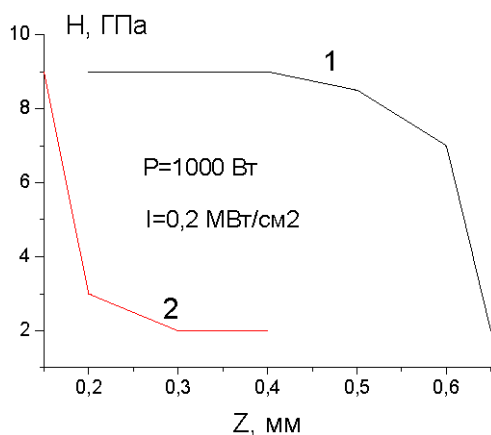


Рис. 3.2. Распределение микротвердости H по глубине стали-45: 1 – $V = 0,6$ м/мин; 2 – $V = 4,2$ м/мин; $H = 2$ ГПа – уровень исходной микротвердости стали

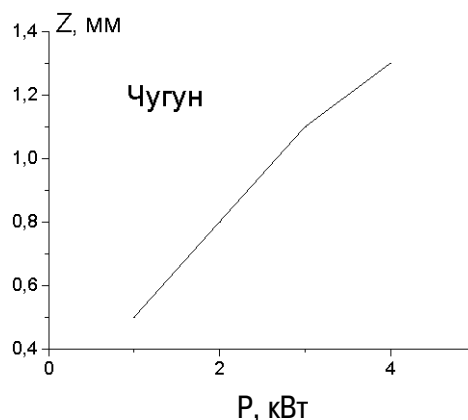


Рис. 3.3. Глубина заковки чугуна при воздействии CO_2 -лазером со скоростью $V = 1$ см/с

Распределение микротвердости H в стали (марка ст.45) при обработке CO_2 -лазером непрерывного действия с различными скоростями перемещения луча показано на рис. 3.2. На рис. 3.3 приведена глубина заковки (обычно 0,3...1,5 мм) для чугуна.

Лазерную заковку применяют для различных металлов.

Закалка сталей. Микротвердость после лазерной закалки зависит от содержания в стали углерода. Чем больше содержание углерода, тем выше микротвердость.

На углеродистых сталях микротвердость после обработки достигает 12 000 МПа.

Легированные стали (ШХ-15, 9Х) обычно имеют низкое содержание углерода, однако и они закаливаются до ~ 12 000 МПа.

Высоколегированные инструментальные стали (штамповые и быстрорежущие) упрочняются до $H_{\mu} \sim 10\ 500$ МПа.

Обработка сталей ведется обычно с небольшим оплавлением поверхности. Во многих случаях закалка с оплавлением поверхности предпочтительнее, однако в зоне оплавления после закалки возможно появление микротрещин. Это явление нежелательно, поэтому при выборе режима обработки и типа лазера (импульсно-периодический или непрерывного действия) необходимо учитывать, какой будет результат по микротвердости, структуре зерен, глубине закалки и наличию микротрещин. Общий результат или критерий закалки – это высокая износостойкость. Закалка увеличивает износостойкость до 80 раз, что в 3...4 раза выше, чем при обычной термической закалке. На рис. 3.4 приведен износ стали одной и той же детали без закалки и с закалкой. Видно, что минимальный износ наблюдается при лазерной закалке.

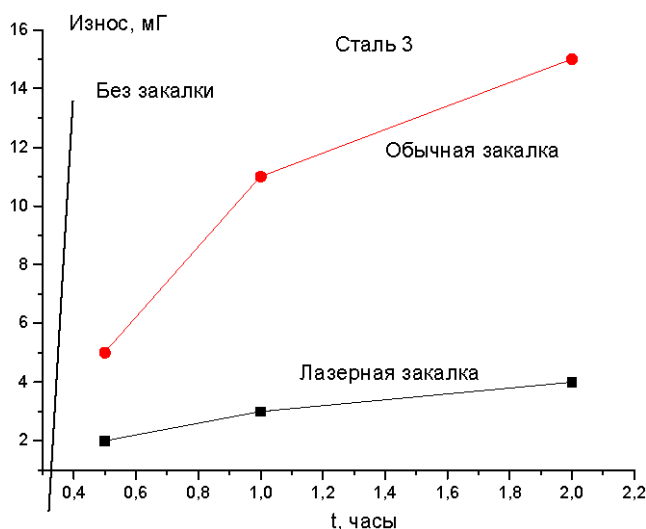


Рис. 3.4. Износ стали-3 без закалки и с закалкой разными способами

Закалка титановых сплавов. Закалка титановых сплавов ведется преимущественно с оплавлением поверхности и зависит от среды, в которой ведется обработка. Например, после обработки сплава ТВ-6 пучком CO_2 -лазера мощностью $P_o = 2000$ Вт со скоростью 14 мм/с микротвердость H_{μ} и глубина оплавления $Z_{пл}$ составили соответственно:

- 16 000 МПа и 0,77 мм – для воздуха;
- 7 500 МПа и 0,43 мм – в атмосфере гелия, т. е. обработка в атмосфере воздуха более эффективна.

Цирконевые сплавы обрабатываются аналогично титановым. Типичный сплав Н-1 при обработке на воздухе имеет $H_{\mu} \sim 6000$ МПа.

Алюминиевые и медные сплавы (дуралюмины, бронзы и пр.) упрочняются незначительно, т. е. микротвердость увеличивается в 1,5...2 раза.

Таким образом, лазерная закалка (термоупрочнение) отличается:

- высокой H_{μ} поверхности и высокой износостойкостью;
- возможностью локальной обработки деталей по поверхности и по глубине;
- обработкой труднодоступных участков;
- возможностью менять глубину закалки в широких пределах.

К недостаткам можно отнести:

- сложность подбора режима обработки;
- возможные деформации при обработке больших участков детали.

Наиболее эффективно использование лазерной термической обработки в машиностроении с применением лазеров непрерывного действия с мощностью $P_o > 1000$ Вт и автоматизированной системой управления лазерного технологического процесса.

3.2. Лазерное легирование и наплавка

Легирование. В принципе, лазерное легирование схоже с лазерным термоупрочнением с оплавлением поверхности. Отличие заключается в том, что перед термической обработкой на поверхность изделия наносится слой легирующего материала (обмазка), который после расплавления перемешивается с расплавленной поверхностью, образуя сплав высокого качества. При этом вся деталь изготавливается из дешевого, легкообрабатываемого материала, а дорогие легирующие добавки расходуются в тонком слое и на локальных участках.

Упрощенная схема ЛТУ для легирования приведена на рис. 3.5.

Размер зоны обработки d_n находится из соотношения:

$$\frac{d_o}{f'} = \frac{d_n}{\Delta f}, \quad d_n = \frac{d_o}{f'} \cdot \Delta f. \quad (3.6)$$

Средняя глубина легированных слоев составляет 0,3...0,4 мм при ИПР и 0,3...1,0 мм при обработке лазером непрерывного действия. Обработка чаще всего производится в атмосфере инертных газов.

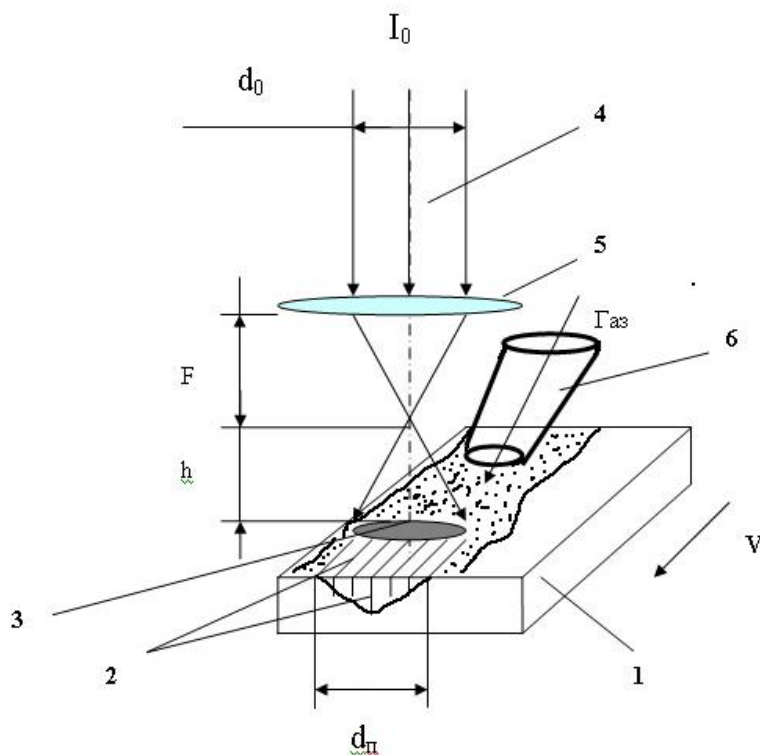


Рис.
ЛТУ

3.5. Схема
для

легирования:

- 1 – образец, движущийся со скоростью V ; 2 – легированный слой;
 3 – ванна расплава; 4 – лазерный пучок; 5 – фокусирующий объектив;
 6 – сопло для подачи газа; d_0 – диаметр лазерного пучка,
 d_n – диаметр пятна на детали

Типы легирования. Они определяются типом легирующей обмазки и материалом изделия. Чаще всего легирующие обмазки готовят из растворов графита (сажи) в ацетоне или спирте (*цементация*), в виде паст на основе аммиачной соли (*азотирование*), на основе порошка кремния (*силицирование*), в виде обмазок, содержащих порошок бора (*борирование*). В некоторых случаях удается повысить микротвердость до 17 000...21 000 МПа. Алюминиевые сплавы после легирования повышают микротвердость до 10 000 МПа.

Легирование можно проводить и металлами. Например, чугуны и стали легируют хромом и никелем. Титановые сплавы – Fe, Ni, Cr.

Газопорошковая лазерная наплавка (ГПН). Она осуществляется принудительной подачей порошка газовым потоком в зону лазерного оплавления поверхности. При этом частицы порошка достигают поверхности уже нагретыми до температуры плавления. Схема процесса ГПН показана на рис. 3.6.

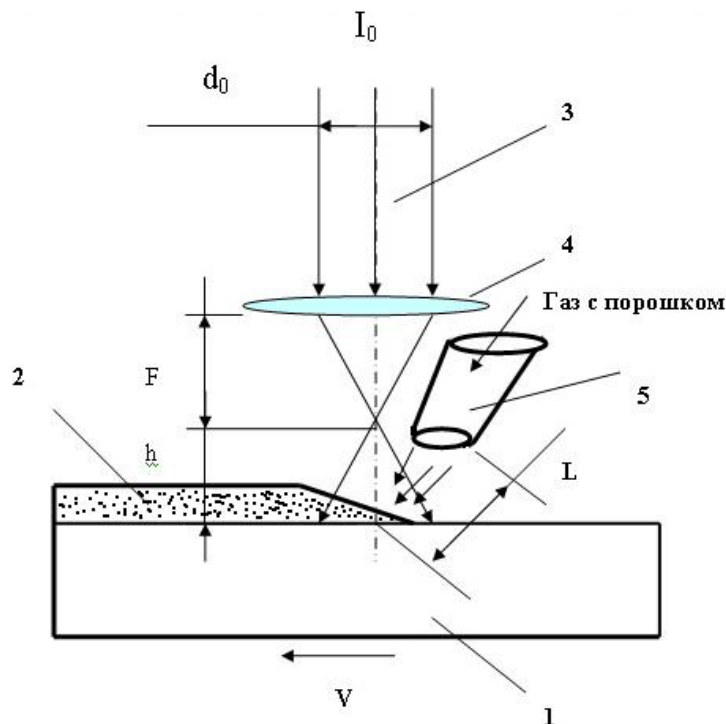


Рис. 3.6. Схема ЛТУ для газопорошковой наплавки:
 1 – образец, движущийся со скоростью V ; 2 – наплавленный слой;
 3 – лазерный пучок; 4 – фокусирующий объектив;
 5 – сопло для подачи газа с порошком; d_0 – диаметр лазерного пучка,
 L – расстояние от сопла до детали

Этот метод требует расчета, который связывает мощность лазера P_0 с размерами частиц порошка и его расходом, скоростью подачи порошка, скоростью движения V , шириной и высотой валика наплавки и геометрией рисунка (L , h и др.).

Подача порошка осуществляется с помощью таких газов, как воздух, азот, гелий, аргон, CO_2 . Для защиты от окисления лучше использовать инертные газы. Прочность сцепления при ГПЛН высока, достигает прочности материала покрытия или материала детали. ГПЛН очень перспективна при ремонтно-восстановительных работах на изношенных участках агрегатов, особенно на тяжело нагруженных участках детали. Наплавка распространена при ремонте на транспорте, в сельском хозяйстве, строительстве, горной промышленности и т. д.

3.3. Лазерная сварка

Сварка – это технологический процесс соединения твёрдых материалов в результате действия межатомных сил, которое происходит при местном сплавлении или совместном пластическом деформировании свариваемых частей. Сваркой получают изделия из металла и неметаллических материалов (стекла, керамики, пластмасс и др.).

Благодаря высокой концентрации энергии излучения в процессе сварки обеспечивается малый объем расплавленного металла, незначительные размеры околошовной зоны термического влияния ($2\sqrt{\alpha\tau}$ – мало), высокие скорости нагрева и охлаждения металла шва и околошовной зоны. Эти особенности определяют минимальные деформации сварных конструкций, высокую технологическую прочность и характерные свойства полученных сварных соединений. Лазерная сварка возможна на локальных участках изделий в труднодоступных местах. Она основана на возникновении ванны расплава в зоне действия луча и последующей кристаллизации расплава при остывании.

Схема образования ванны расплава для разных интенсивностей излучения показана на рис. 3.7.

Для сварки металлов используются твердотельные и газовые лазеры, как импульсно-периодического действия, так и непрерывного действия. Образование расплава (в отсутствие поглощающих покрытий) легко осуществляется при мощностях лазера:

100...500 Вт для лазеров на YAG;

1,5...5 кВт для лазеров на CO₂.

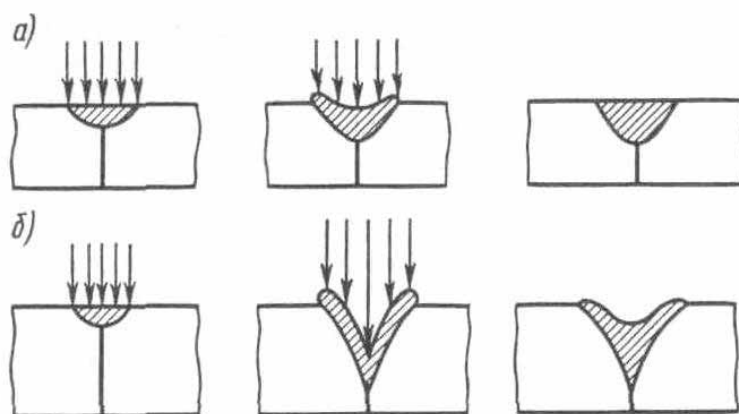


Рис. 3.7. Схема образования ванны расплава:
а – незначительное испарение; б – интенсивное испарение

Лазерная сварка осуществляется в широком диапазоне режимов, обеспечивающих высокопроизводительный процесс соединения металлов толщиной от нескольких микрон до десятков миллиметров.

При лазерной сварке поглощающие покрытия практически не применяются (применение не целесообразно при $I_0 > 10^6$ Вт/см²). Как и при обычной сварке, этот процесс может осуществляться как на воздухе, так и в атмосфере инертных газов с целью исключения процессов окисления металлов в расплаве (появление окислов в расплаве приводит к ослаблению сварного соединения). Подача защитного газа происходит че-

рез специальное сопло, чаще всего совмещенное с технологическим объективом (ТО). В технологическом процессе необходимо осуществлять отсос (откачку) продуктов разрушения в газовой фазе. Особенно это важно в режиме глубокого проплавления и в атмосфере воздуха.

3.3.1. Лазерная сварка малых толщин

Сварка тонких пластин ($h < 1$ мм) и проволоки проводится при невысоких плотностях потока $- I_o \approx 10^5 \dots 10^6$ Вт/см², когда глубокое проплавление (заглубление пучка) отсутствует. Глубина проплавленного слоя должна быть равна диаметру проволоки или толщине пластин h , где

$$h = 2\sqrt{\alpha\tau}. \quad (3.7)$$

Длительность воздействия τ находится как $\tau = \frac{h^2}{4\alpha}$.

При ИПР $\tau = \tau_n$; для меди $10^{-4} < \tau_n < 5 \cdot 10^{-4}$ с; для алюминия $5 \cdot 10^{-4} < \tau_n < 2 \cdot 10^{-3}$ с; для сталей $5 \cdot 10^{-3} < \tau_n < 8 \cdot 10^{-3}$ с.

При непрерывном действии $\tau = d_n/v_{св}$, где d_n – диаметр пятна фокусировки; $v_{св}$ – скорость сварки.

Необходимая минимальная плотность мощности должна обеспечивать температуру плавления металла:

$$I_{nl} = \frac{T_{nl} \cdot \lambda_T \cdot \sqrt{\pi}}{A \cdot 2\sqrt{\alpha\tau}}, \quad W_n = \frac{0,885T_{nl} \cdot \lambda_T \tau_n \frac{\pi d_n^2}{4}}{\sqrt{\alpha\tau_n}}. \quad (3.8)$$

Сварка деталей малых толщин может быть шовной или точечной, может быть выполнена встык или внахлест.

Технологические особенности импульсной сварки различных типов соединений целесообразно рассматривать применительно к конкретным группам деталей, изготовление которых осуществляется с применением лазерной сварки. В общем случае все детали можно разделить по типам соединений на четыре основные группы:

- 1) сварка проволок между собой;
- 2) сварка проволок с массивными деталями;
- 3) сварка тонколистовых деталей с массивными;
- 4) сварка массивных деталей и деталей из листовых материалов.

Наиболее широко используется импульсная лазерная сварка для выполнения соединений проволок разного диаметра из разных материалов в точном приборостроении, электронике, измерительной технике и радиотехнике. Особенностью способа является возможность сварки проводов с изоляцией, так как она сгорает и испаряется под воздействием излучения еще до начала плавления металла. Сваривают проволоки толщиной от 0,01 до 1,0 мм.

Наиболее благоприятным является *параллельное соединение проволок* (рис. 3.8, *а*). Особенностью сварки этого типа соединения является образование между соприкасающимися цилиндрическими поверхностями клиновидного зазора. Такой зазор играет роль «светоловушки». Для достижения максимальной прочности диаметр светового пятна при сварке параллельных проволок желательно выбирать приблизительно равным двум диаметрам проволоки, располагая центр пятна на расстоянии 0,5...0,8 диаметра проволоки от ее концов.

При сварке *проволоки встык* (рис. 3.8, *б*) диаметр светового пятна выбирают примерно равным диаметру проволоки. Если материал обеих проволок одинаков, то центр светового пятна совмещают с плоскостью стыка. При сварке разнородных металлов центр светового пятна смещают в сторону проволоки из металла, имеющего более высокую теплопроводность, температуру плавления или коэффициент отражения. При нагреве излучением концы проволок оплавляются. Под действием сил поверхностного натяжения расплавленный металл стягивается в две капли, которые затем объединяются в одну, образуя жидкий «мост» между свариваемыми проволоками.

Не представляет особых затруднений получение *угловых* и *торцовых соединений проволок* (рис. 3.8, *в*). В этих случаях между цилиндрической поверхностью одной из проволок и торцом другой также возникает клиновидный зазор – «светоловушка», позволяющий повысить эффективность использования излучения.

Возможно соединение *перекрещивающихся проволок*. При этом излучение целесообразно направлять в область их контакта (рис. 3.8, *г*).

При сварке *торцов проволок* (рис. 3.8, *д*) диаметр светового пятна должен быть равен двум диаметрам проволоки. Зазор между проволоками не должен превышать 0,1 мм.

Технология сварки проволок используется для обеспечения электрического контакта, а также для крепежа – в электронной и электротехнической промышленности.

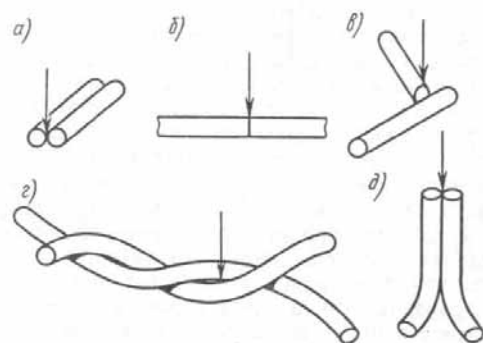


Рис. 3.8. Типы сварных соединений проволоки:

- а* – параллельное соединение; *б* – сварка встык; *в* – угловое соединение;
- г* – соединение скрещивающихся проволок;
- д* – торцовое соединение

Второй группой деталей являются соединения проволоки диаметром 0,15...1,0 мм с массивными деталями толщиной (диаметром) более 0,5 мм (рис. 3.9, а–в).

При сварке проволоки с массивной деталью *внахлест* (рис. 3.9, а) необходимо обеспечить плотное поджатие свариваемых деталей. Диаметр светового пятна выбирают больше или равно диаметру проволоки. Излучение следует направлять одновременно на проволоку и на деталь, если их материалы имеют равные или близкие значения теплофизических свойств, либо только на проволоку, если ее материал имеет большую температуру плавления, теплопроводность, коэффициент отражения.

Наиболее надежно и просто выполняются соединения проволоки с массивной деталью, толщина которой значительно больше диаметра проволоки, при *укладке ее в отверстия или в пазы* (рис. 3.9, б, в).

Третья группа объединяет типы соединения деталей, при изготовлении которых требуется приварка тонких элементов толщиной 0,01...0,15 мм к массивным деталям толщиной более 1,0 мм.

В зависимости от конструкции детали рекомендуются различные типы соединений. При сварке плоских выводов к проводникам печатных плат могут быть использованы приемы, показанные на рис. 3.10, а. В первом случае излучение направляют на свариваемые детали так, чтобы оно одновременно попадало как на плоский вывод, так и на проводник печатной платы. Это соединение требует наименьших затрат энергии излучения, однако не всегда удовлетворяет требованиям прочности. Поэтому целесообразно применять двух- и трехточечное соединение. Лучшие результаты получаются

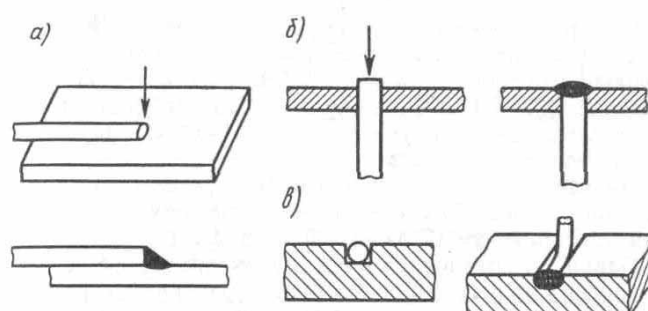


Рис. 3.9. Типы соединений проволоки с массивными деталями:

а – сварка *внахлест*; б – сварка при размещении проволоки в отверстии; в – сварка с укладкой проволоки в паз

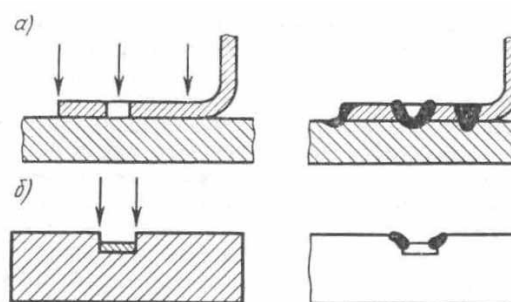


Рис. 3.10. Типы сварных соединений тонких плоских деталей с массивными деталями

при сварке через отверстие, предварительно просверленное в плоском выводе. Диаметр светового пятна при этом выбирают примерно в 2 раза большим, чем диаметр отверстия. Возможно также соединение деталей со сквозным проплавлением вывода.

Для сварки материалов малой толщины с высоким коэффициентом отражения излучения и с высокой тепловой проводимостью (Al, Cu) лучше использовать неодимовые лазеры (YAG-лазеры), поскольку их излучение больше поглощается, да и сам лазер имеет меньшие габариты. Так сварка фольги толщиной до 30 мкм из Al и Cu неодимовым лазером ($P_o = 200$ Вт) идет со скоростью $v_{св} = 1$ м/с. CO₂-лазер той же мощности, при скорости $v_{св} = 0,1$ м/с, не может даже оплавить поверхность.

Для остальных металлов мощности, необходимые для достижения заданной скорости сварки при фиксированной толщине материала, оказываются примерно одинаковыми для лазеров на АИГ с неодимом и CO₂-лазеров с сопоставляемыми уровнями выходной мощности. Это означает, что в обоих случаях энергия излучения поглощается достаточно хорошо.

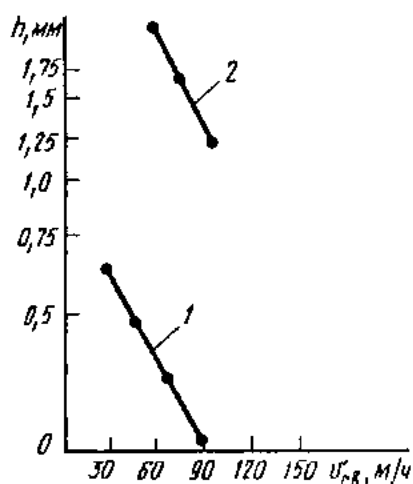


Рис. 3.11. Зависимость глубины проплавления при использовании твердотельного АИГ-лазера мощностью 400 Вт от скорости сварки: 1 – непрерывный режим; 2 – импульсный режим (частота 200 Гц)

Большую роль играет режим работы лазера. На графиках (рис. 3.11) показаны зависимости глубины проплавления от скорости сварки для импульсного и непрерывного режимов твердотельных лазеров с приблизительно равной средней мощностью на уровне 400 Вт. В диапазоне малых скоростей импульсный режим более эффективен.

Тем не менее, сварка с помощью непрерывных твердотельных и газовых лазеров с уровнем мощности порядка сотен ватт успешно осуществляется в разных областях, в таких как герметизация корпусов реле с термочувствительными элементами, приварка наконечников к лопастям

газовых турбин, создание контурных швов на турбинных лопатках из инконеля, приварка наконечников к топливным элементам и др.

3.3.2. Лазерная сварка металлов с глубоким проплавлением

Сварка лучом мощного лазера с глубоким проплавлением ($h > 1$ мм) принципиально отличается от сварки малых толщин специфическим формированием сварного шва за счет наличия парогазового канала, что сказывается на особенностях технологии этого способа.

Основными параметрами режимов лазерной сварки с глубоким проплавлением являются: мощность лазерного излучения; скорость сварки; параметры фокусирующей системы.

Вспомогательные параметры характеризуют: защиту шва от окисления, качество подготовки и сборки под сварку, повышение эффективности проплавления и др.

Глубокое проплавление возможно при плотностях мощности ($I \sim 10^6 \dots 10^7$ Вт/см²), обеспечивающих температуру кипения металла:

$$I_o > I_{\text{кин}} = \frac{T_{\text{кин}} \cdot \lambda_T \sqrt{\pi}}{A \cdot 2\sqrt{\alpha\tau}} \quad (3.9)$$

Для сварки с глубоким проплавлением чаще используют СО₂-лазеры большой мощности, т. к. они имеют высокий КПД и достаточно большое значение A (A растет с увеличением q_o). Диаметр d_n сфокусированного пучка берется в пределах $d_n = 0,5 \dots 1$ мм. При $d_n < 0,5$ мм велико испарение (может возникнуть резка материала), при $d > 1$ мм мала глубина h и эффективность сварки. В импульсно-периодическом режиме сварки (скважность $G > 1$) ширина шва

$$e = d_n + 2\sqrt{\frac{\alpha\tau}{G}} \quad (3.10)$$

уменьшается с увеличением G , а h – увеличивается.

Изменение значений мощности излучения P в большую сторону повышает эффективность действия луча, увеличивает ее глубину проплавления (h) и ширину (e) шва (рис. 3.12, *a*). При средних уровнях мощности и больших скоростях сварки (около 100 м/ч) глубина проплавления увеличивается пропорционально мощности излучения. В случае снижения скорости сварки или существенного увеличения мощности эта зависимость отличается от прямолинейной и может быть оценена по выражению

$$h \sim \kappa P^{0,7}, \quad (3.11)$$

где κ – коэффициент пропорциональности.

Ширина шва имеет примерно такую же закономерность, что и глубина, однако темп ее роста значительно ниже.

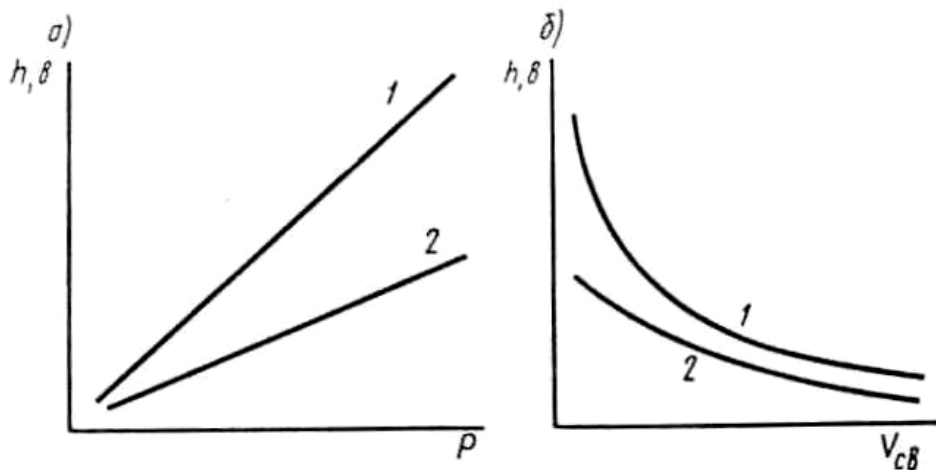


Рис. 3.12. Характер зависимостей глубины проплавления (1) и ширины шва (2) от мощности излучения P (а) и скорости сварки $V_{св}$ (б)

Скорость сварки не имеет прямо пропорциональной зависимости от параметров проплавления, что видно на рис. 3.12, б. При скоростях лазерной сварки в диапазоне 10...30 м/ч глубина проплавления резко падает с увеличением скорости, ширина шва также уменьшается. В диапазоне скоростей 50...100 м/ч интенсивность уменьшения глубины проплавления снижается, а при скоростях более 100...150 м/ч она становится минимальной.

Ширина шва также уменьшается с увеличением скорости сварки. Необходимо отметить, что в первом диапазоне скоростей (10...30 м/ч) ширина шва существенно превышает диаметр парогазового канала. В этом случае значительная часть мощности луча расходуется на разогрев и плавление металла в результате отвода теплоты от стенок канала. При увеличении скорости сварки ширина шва все более приближается к диаметру канала и потери на теплопроводность снижаются. Поэтому выполнять лазерную сварку с высокой скоростью экономичнее и технологически более выгодно.

Диаметр сфокусированного луча оказывает непосредственное влияние на плотность мощности и соответственно на геометрию проплавления. Оптимальным является диаметр луча, обеспечивающий «кинжальное» проплавление с коэффициентом формы шва более 1,0. Под коэффициентом формы шва понимается отношение глубины проплавления к ширине шва. Отклонение от оптимального значения приводит к увеличению ширины шва и снижению глубины проплавления. Режим проплавления переходит в теплопроводностный, и эффективность процесса падает. Однако геометрические размеры проплавления зависят не только от диаметра сфокусированного луча, но и от его положения относительно поверхности свариваемых деталей. Сфокуси-

рованный луч может быть заглублен под поверхность материала или располагаться над ним. Оптимальная величина этого смещения, обеспечивающая максимальную глубину проплавления, зависит от материала, толщины свариваемых деталей и режимов сварки.

Защита сварного шва от окисления. На показатели качества шва существенное влияние оказывают некоторые вспомогательные параметры. В первую очередь это относится к средствам защиты металла шва от окисления.

Принципиально возможны три метода защиты шва от окисления: газовая, флюсовая и газоплюсовая защита.

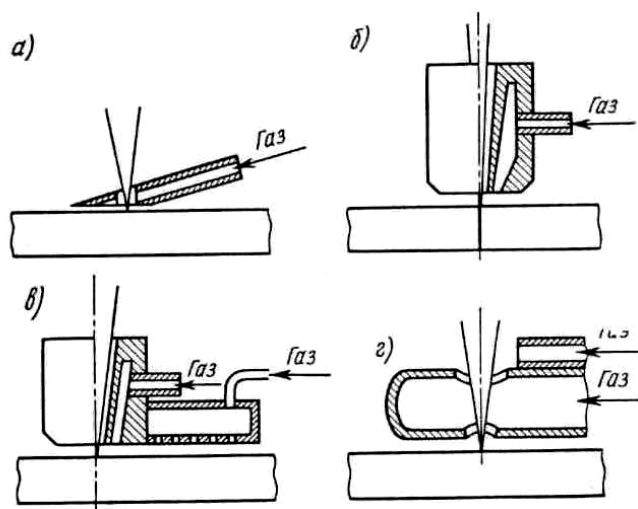


Рис. 3.13. Схемы конструкций защитных сопел

Наибольшее распространение и практическое применение имеет газовая защита. При этом методе, так же как и в случае дуговой сварки, защитный газ через сопло подается в зону взаимодействия источника энергии с материалом. Специфика лазерной сварки обуславливает применение специальных сопел и составов защитных газов, обеспечивающих как надежную защиту, так и эффективное проплавление.

Существуют следующие требования к защитным соплам и системе подачи газа:

- 1) элементы конструкции сопла должны обеспечивать сдув потока паров и брызг, образующихся при сварке, в сторону от оси действия луча или существенно уменьшить размеры этого потока;
- 2) конструкция сопла должна обеспечивать оттеснение воздуха от зоны сварки струей защитного газа;
- 3) защитный газ должен предотвращать окисление металла и не способствовать образованию внутренних дефектов в виде пор, раковин, газовых включений и пр.;

4) газ, подаваемый в зону обработки, должен способствовать снижению экранирующего действия плазменного факела.

На рис. 3.13 показаны некоторые конструкции сопел. Наиболее простой и в то же время эффективной конструкцией является медная трубка, один конец которой срезан под углом $30...40^\circ$, а по образующей на поверхности среза просверлено отверстие для прохождения луча (рис. 3.13, а). Помимо этого, может быть использовано сопло, подобное соплу для дуговой сварки с коаксиальной подачей газа (рис. 3.13, б). Диаметр выходного отверстия среза сопла составляют $2,0...3,5$ мм. При сварке высокоактивных материалов, таких, например, как титан, используют дополнительные хвостовики с самостоятельной подачей газа (рис. 3.13, в). В случае сварки на повышенных уровнях мощности применяют дополнительные устройства для сдува потока газов и брызг (рис. 3.13, г).

Необходимо отметить, что при глубоком проплавлении возможен оптический пробой (разряд) вблизи поверхности образца, который может уменьшить проплавляющую способность и потребует более высокую интенсивность излучения I_0 . Это эквивалентно уменьшению коэффициента поглощения A в формуле (3.9). На практике этот нежелательный эффект можно снизить подачей защитного газа через сопло.

Различные газы по-разному влияют на экранирующее действие разрядного факела. Для защиты от окисления лучше использовать инертные газы. Максимальную глубину проплавления обеспечивают газы, имеющие высокий потенциал ионизации и высокую теплопроводность. Наилучшие результаты дает защита шва гелием (табл. 3.1). Достаточно эффективно могут быть использованы такие газы, как азот, аргон и углекислый газ. Добавки аргона в гелий приводят к некоторому уменьшению глубины проплавления, однако это снижает расход гелия, относительно дорогого газа, а также увеличивает плотность подаваемой смеси, что благоприятно влияет на эффективность оттеснения воздуха от поверхности сварочной ванны. В целях экономии расхода дорогостоящих газов используют различные варианты смесей из газов, представленных в табл. 3.1.

Обычный расход газа при сварке $\sim 10^{-3}...10^{-4}$ м³/с.

Таблица 3.1

Параметры сварки для разных газов

Защитный газ	Теплоемкость C , кДж/кгК	Потенциал ионизации U , В	Плотность ρ , кг/м ³	Глубина проплавления h , мм	КПД проплавления
Гелий	5,2	24,5	0,178	6,1	0,65
Азот	1,04	14,5	1,25	4,9	0,5
СО ₂	0,88	13,2	1,98	5,1	0,6
Аргон	0,53	15,7	1,78	1,0	0,4
He/Ar = 1/1	–	–	0,95	6,0	0,63

Примечание. Режим сварки – $P = 4,5$ кВт, $V = 100$ м/ч.

При сварке малых толщин рабочий газ предохраняет от окисления; при глубоком проплавлении – затрудняет оптический разряд и увеличивает КПД проплавления посредством передачи энергии на дно лунки за счет разогретой газовой струи.

3.3.3. Технологические особенности лазерной сварки конструкционных материалов

Сварка сталей. Лазерным лучом возможна сварка практически всех существующих типов сталей. Однако это целесообразно только в тех случаях, когда основные преимущества метода имеют принципиальное значение для решения поставленных задач и другими способами сварки решить их невозможно.

Наиболее перспективные области применения лазерного источника нагрева для сварки сталей следующие:

1. Сварка сталей, склонных к образованию холодных и горячих трещин (с целью повышения технологической прочности соединений).
2. Сварка сталей, например мартенситно-старяющихся (с целью снижения размеров зоны термического влияния и величины карбидной сетки для повышения коррозионной стойкости соединений).
3. Применение лазерного луча, как альтернативы электронного, при изготовлении крупногабаритных деталей.
4. Сварка деталей, к которым предъявляются жесткие требования по геометрии сварных соединений. В этом случае лазерная сварка может оказаться окончательной операцией, исключая последующую механическую обработку.
5. Сварка разнородных, трудносвариваемых сталей.
6. Сварка некоторых сталей в закаленном состоянии, когда устраняется необходимость последующей и предварительной термообработки.

При разработке технологических процессов сварки сталей лучом лазера, для обеспечения качества и надежности соединений, необходимо учитывать следующие положения:

1. Подготовку свариваемых кромок следует выполнять на металлорежущих станках (строгание, фрезерование, точение), что обеспечивает необходимую точность сборки и отсутствие изменения структуры в месте обработки.

2. Поверхность металла в зоне сварки следует очищать от окалины, ржавчины, других загрязнений, а также от влаги. Перечисленные загрязнения создают условия для образования пористости, окисных включений, а в некоторых случаях и трещин в металле шва и зоне термического влияния за счет насыщения водородом.

3. Зачистку поверхности следует производить щетками из нержавеющей стали на участке не менее 10...15 мм как сверху, так и снизу свариваемых кромок. Зачищаются также и торцы, если они имеют окисленную поверхность. После зачистки место сварки обезжиривают.

4. В случае сварки деталей, упрочняемых термической обработкой, особенно крупногабаритных, подготовку кромок под сварку (подрезку торца, выполнение разделки) и их зачистку следует выполнять после термической обработки для обеспечения необходимой точности сборки свариваемых деталей и параметров шероховатости поверхности.

5. Сборка под сварку должна обеспечивать возможность тщательной подгонки кромок на всей длине шва с минимальным зазором за счет применения специальных сборочных приспособлений.

6. При сборке под сварку ставить прихватки не рекомендуется. В случае необходимости прихватки выполнять лучом лазера.

7. Предпочтительным соединением является стыковое. На углеродистых сталях нахлесточные и замковые соединения применять не рекомендуется из-за высокой их чувствительности к концентраторам напряжений.

8. По возможности предусматривать припуск (0,5..0,8 мм) по толщине свариваемых кромок на обработку лицевой и корневой поверхности шва для ликвидации возможных подрезов и неравномерных проплавов.

9. Защиту поверхности шва от окисления рекомендуется осуществлять через специальное сопло гелием или смесью гелия с аргоном.

Разные стали. Низкоуглеродистые (содержание углерода $C < 0,25\%$) и низколегированные стали (легирующие добавки $< 4\%$) свариваются хорошо до толщин $h = 15...20$ мм за один проход сварки со скоростью $V_{св} > 40$ мм/с.

Среднеуглеродистые легированные стали ($C = 0,26...0,45 \%$) и высокоуглеродистые легированные стали ($C = 0,46...0,75 \%$) с легированными добавками до 10 % также хорошо свариваются. Лазерная сварка этих сталей дает более высокое качество шва.

Высоколегированные стали (содержат $> 10 \%$ легированных добавок), например сталь $12 \times 18 Н 10Т$ (нержавейка), имеет прочность сварного соединения на уровне основного металла, а пластичность выше, т. е. очень хорошо сваривается.

Сварка алюминиевых сплавов. Они характеризуются высокой теплопроводностью, поэтому для сварки требуется большее количество энергии, чем для сварки сталей. После сварки наблюдаются остаточные деформации (так как высок коэффициент линейного расширения и мал модуль упругости).

Для получения качественного сварного соединения необходима тщательная очистка поверхности. При сварке необходима газовая защита. Высокое качество и большую глубину h обеспечивает применение гелия.

Хорошая форма шва обеспечивается на скоростях $v_{св} > 22$ мм/с. На пластинах из сплава АМГ-6 толщиной $h = 2$ мм шов имеет ширину $b = 2,0$ мм. С увеличением мощности лазера h увеличивается без заметного увеличения b . Дуговыми методами сварки такую форму шва получить невозможно.

Сварка магниевых и титановых сплавов. Они склонны к окислению. При их сварке необходима тщательная очистка и защита шва. Свариваемые кромки очищают шабером или фрезируют, травят и т. д. Для защиты при сварке используют гелий высокой степени чистоты, при этом защищается не только расплав, но и остывающие участки, а так же околошовная зона. Удельные энергозатраты составляют порядка 1 кВт на $h = 1$ мм.

3.4. Лазерная резка

Лазерная резка относится к числу первых освоенных лазерных технологических операций. Различают лазерную резку металлов и неметаллических материалов. Резку производят в испарительном режиме при интенсивностях $I_0 > (10^6...10^7)$ Вт/см².

3.4.1. Резка металлов

На участке воздействия лазерного излучения металл нагревается до первой температуры разрушения – плавления. При дальнейшем поглощении излучения металл расплавляется и от участка воздействия излучения в объем материала начинает перемещаться фазовая граница плавления. Наряду с этим, энергетическое воздействие лазерного излучения

приводит к последующему повышению температуры, достигающей второй температуры разрушения – кипения, когда имеет место активное испарение. Скорость испарения экспоненциально зависит от температуры и максимального своего значения достигает при стационарной температуре испарения, когда скорости фазовых границ плавления и испарения одинаковы.

Резку металлов можно проводить в двух режимах – в «жестком» режиме и в режиме газолазерной резки. При «жестком» режиме резания интенсивность излучения превышает плотность потока объемного испарения. Здесь продукты разрушения в канале реза находятся преимущественно в парогазовой фазе и удаляются из канала реза за счет энергии и давления паров. На практике этот режим используется редко, в силу больших энергетических затрат.

Заметное снижение энергозатрат достигается использованием вспомогательного газа для удаления продуктов разрушения. При этом достаточно канал расплавить и удалить расплав газовым потоком. Этот режим резки называют газолазерной резкой. При газолазерной резке сталей и ряда других сплавов в качестве вспомогательного газа используют кислород или воздух, обеспечивающий дополнительный теплоприход в канал в результате экзотермической реакции окисления.

Для металлов наибольшее влияние на глубину реза оказывает скорость резания V_p , затем мощность лазера P_o и давление продуваемого газа P_z (рис. 3.14).

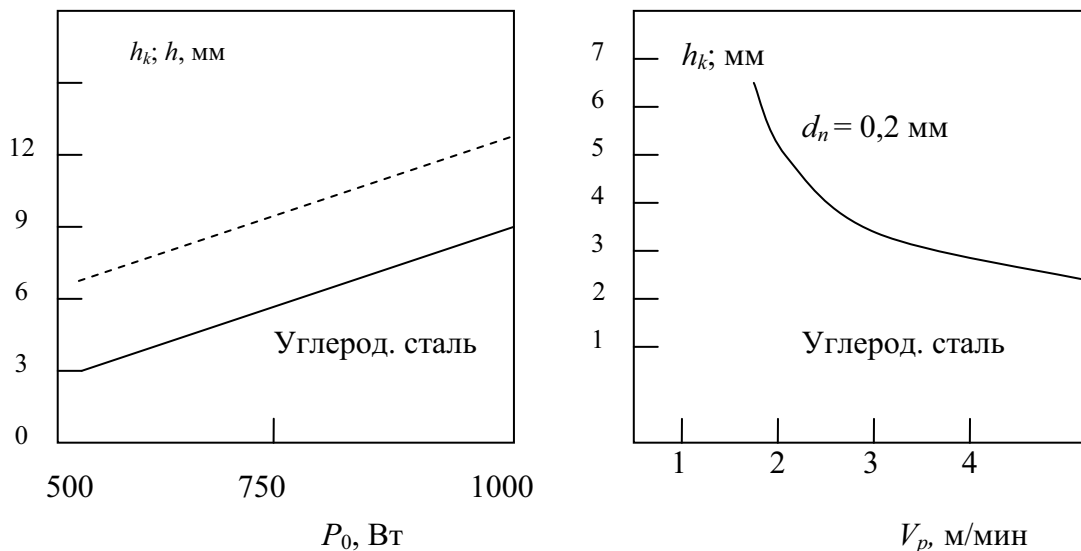


Рис. 3.14. Зависимость глубины реза (h) от мощности излучения и скорости реза: — качественный рез; ---- максимально достижимый рез; h_k – глубина качественного реза

Обычно на краях реза образуются бороздки, даже если облучение непрерывное. В ИПР бороздки более выражены из-за дискретного переноса расплава. Наличие грата (застывшие капли и окислы) на нижней кромке реза снижает качество. В режиме качественного реза углеродистых сталей грата не наблюдается. Очевидно, что в испарительном режиме резки качество должно быть выше (зато менее экономично).

Общая оценка газолазерной резки металлов показывает, что точность и качество выполняемых резов при обработке на оптимальных режимах соответствует высшему классу.

Технологические особенности лазерной резки металлов импульсно-периодическим излучением.

При резке металлов импульсно-периодическим лазерным излучением возникает ряд особенностей. Использование такого излучения при резке позволяет снизить необходимые средние мощности лазера. Температура поверхности жидкой ванны, образованной в результате действия очередного импульса, может быть ниже температуры кипения металла. Расплавленный металл перемещается вдоль канала реза в результате действия газодинамической силы и на него дополнительно действует механический импульс отдачи паров или плазмы, ускоряющий перемещение жидкой ванны вдоль канала реза. Образование и удаление жидкой ванны из канала реза может происходить как за время длительности импульса лазерного излучения, так и в паузе между импульсами.

В зависимости от соотношения толщины разрезаемого металла, энергетических характеристик излучения и скорости резки возможны две схемы формообразования реза по глубине материала. Первая схема имеет место при обработке тонкого листового металла, когда каждый очередной импульс образует в материале элементарное отверстие. При этом в процессе разрушения участвует только часть сфокусированного лазерного пучка, определяемая шагом обработки s^* или коэффициентом перекрытия элементарных отверстий (κ_n):

$$\kappa_n = (2r_3 - s^*)/2r_3, \quad (3.12)$$

где r_3 – входной радиус элементарного отверстия. Следовательно, чем меньше значение κ_n , тем большая часть светового пятна попадает на металл и участвует в разрушении. В пределе, когда $\kappa_n = 0$ (то есть, $s^* = 2r_3$), пятно сфокусированного лазерного излучения полностью участвует в формообразовании реза.

Очевидно, что при дальнейшем увеличении шага обработки s^* рез образовываться не будет, а на металле появятся лишь отдельные отверстия.

Вторая схема имеет место при обработке деталей больших толщин (рис. 3.15).

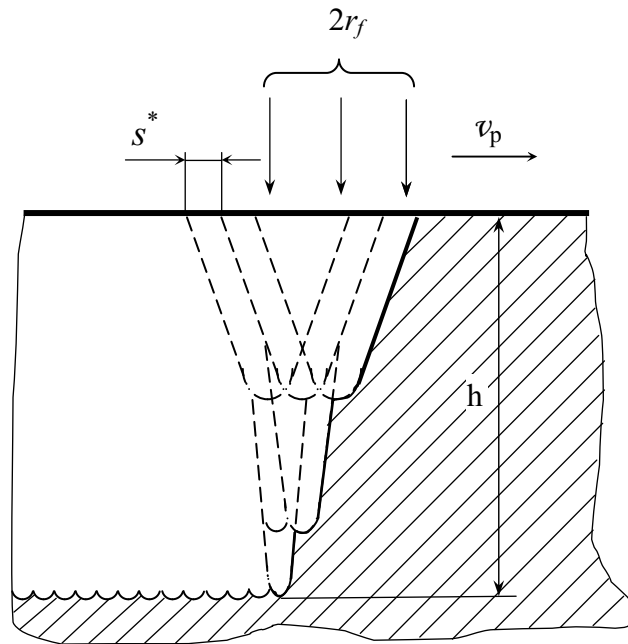


Рис. 3.15. Образование реза при обработке детали большой толщины импульсно-периодическим излучением

Образование реза при этом происходит следующим образом. После перемещения лазерного луча в направлении резки на величину шага обработки s^* передний край светового пятна, попадая на верхнюю кромку детали, образует очередное элементарное отверстие. В то же время остальная часть сфокусированного лазерного пучка участвует в дальнейшем углублении ранее образованных элементарных отверстий, что вызывает появление ступенчатой поверхности разрушения. При этом полная глубина получаемого реза будет зависеть от количества импульсов, подводимых в каждое элементарное отверстие в процессе движения лазерного луча. Количество импульсов n_u зависит от шага обработки s^* , а следовательно, от скорости резки v_p :

$$n_u = [(r_f + r_0)/s^*] + 1, \quad (3.13)$$

где r_f — радиус пятна сфокусированного лазерного излучения.

В связи с тем, что при возрастании фокусного расстояния линзы f глубина области каустики увеличивается, большая глубина реза обеспечивается при использовании длиннофокусных фокусирующих систем. Естественно, эта закономерность будет справедлива до тех пор, пока плотность мощности не начнет существенно уменьшаться при увеличении диаметра пятна за счет возрастания фокусного расстояния ($d_f \sim f$). При увеличении f более некоторой критической величины происходит резкое снижение роста глубины реза, тогда как его ширина монотонно возрастает (рис. 3.16).

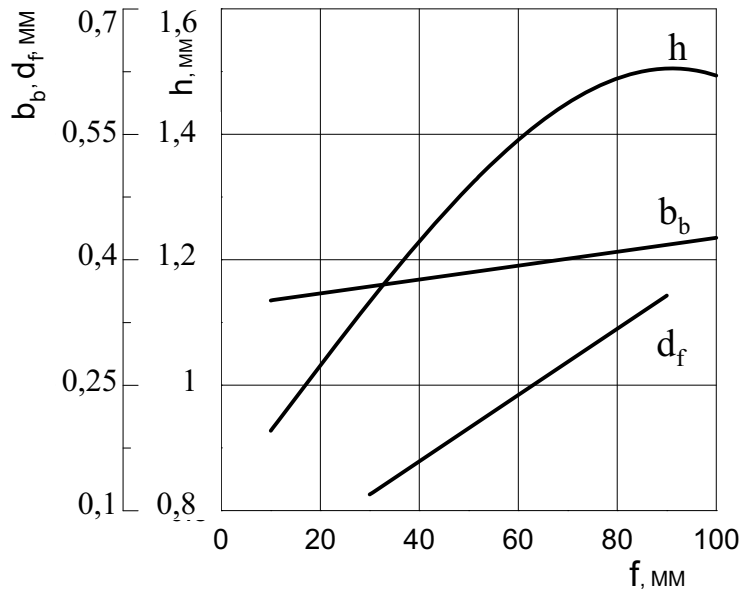


Рис. 3.16. Кривые зависимости глубины (h), ширины (b_b) реза и диаметра пятна фокусировки (d_f) от фокусного расстояния линзы f

На этом же графике представлена зависимость изменения диаметра пятна фокусировки с учетом угловой расходимости лазерного излучения от фокусного расстояния. При возрастании f расхождение между значениями b и d_f снижается, что связано с уменьшением плотности мощности и, следовательно, со снижением теплового влияния лазерного источника за пределами пятна фокусировки.

Помимо рассмотренных технологических факторов важным параметром является величина и направление смещения Δf поверхности металла относительно фокальной плоскости фокусирующей системы.

На рис. 3.17 приведены изменения значений глубины реза и ширины на верхней кромке в зависимости от смещения Δf . Наибольшей глубине и наименьшей ширине соответствуют различные положения детали относительно каустики фокусируемого луча. Так, наибольшая глубина реза для рассматриваемых условий обработки достигается при заглублении фокальной плоскости внутрь образца примерно на 1 мм, тогда как минимальная ширина реза получается при фокусировании излучения вблизи поверхности детали.

Кроме того, глубина реза возрастает (однако менее интенсивно) при уменьшении длительности импульса в результате некоторого повышения плотности мощности лазерного излучения.

Таким образом, при необходимости получения наиболее глубоких резов обработку следует проводить с применением длиннофокусных (до

определенного предела) линз на низких скоростях резки при высокой плотности лазерного излучения (импульсами высокой энергии и малой длительности) и смещением фокальной плоскости фокусируемого лазерного излучения внутрь разрезаемой детали на 1...1,5 мм.

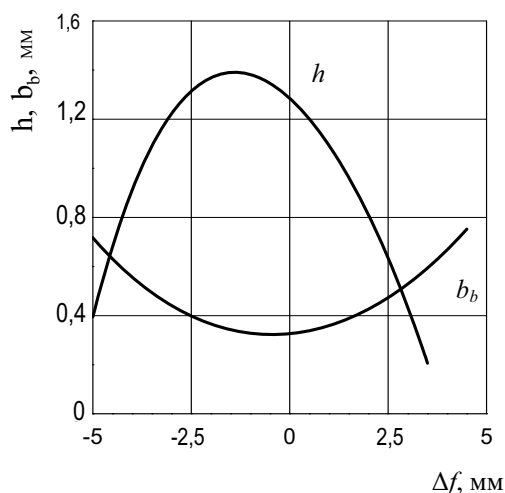


Рис. 3.17. Кривые влияния степени расфокусировки лазерного пучка на глубину (h) и ширину (b_b) реза

Общие закономерности для ширины реза таковы: ширина реза на верхней кромке b_e и нижней кромке b_n металла возрастает с увеличением энергии излучения, фокусного расстояния линзы и уменьшением длительности импульса.

На ширину реза верхней кромки b_e наибольшее влияние оказывает энергия излучения, тогда как на b_n – фокусное расстояние f .

Изменение скорости резки не влияет на ширину реза b_e . Вместе с тем, понижение скорости обработки ведет к заметному увеличению ширины реза на нижней кромке, причем более интенсивно – при повышении энергии излучения и менее интенсивно – при увеличении фокусного расстояния линзы.

Таким образом, наиболее узкие пазы и резы могут быть получены при обработке с применением короткофокусных линз на низких плотностях мощности. Уменьшение скорости резки при этом дает возможность получать резы большой глубины и с меньшей непараллельностью кромок. В случае, когда требуется достичь минимального отклонения стенок реза от параллельности, обработку следует выполнять на малых скоростях с низкой плотностью мощности, при использовании длиннофокусной оптики.

В табл. 3.2 приведены параметры реза для различных металлов с помощью непрерывного CO_2 -лазера.

Таблица 3.2

Режимы газолазерной резки металлов CO₂-лазером

Газ	Разрезаемый материал	Мощность излучения лазера P_0 , кВт	Скорость резки v_p , м/мин	Толщина материала h , мм	Ширина реза b , мм
O ₂	Низкоуглеродистая сталь	0,1	1...1,6	1	–
		0,2	1,5...1,7	2	–
	Углеродистая сталь	1,5	1,0	5,2	0,51
		1,5	8,0	1,0	0,37
	Коррозионно-стойкая сталь (нержав.)	0,3	2...3	0,5	–
		2,0	1,5...2	6,5	–
O ₂	Алюминиевые сплавы	3,0		5,0	1,0
N ₂	АМГ	4,0	2,7	4,0	0,5
воздух	Титановые сплавы ОТ-4	2,0	12,0	1,2	–
O ₂		0,6	2,5	15,0	1,0
O ₂		2,0	1,1	1,0	0,46

3.4.2. Лазерная резка неметаллов

Лазерной резке одинаково легко поддаются такие высокотвердые материалы, как металлокерамика, стеклоуглерод, композиционные материалы на основе нитей бора и углерода. Высокое качество реза достигается при лазерной резке стеклоткани, наряду с этим улучшаются условия труда за счет уменьшения количества стеклопыли по сравнению с механической резкой. Большое преимущество обеспечивает лазерная резка в деревообрабатывающей промышленности. Например, при раскрое фанеры отсутствуют опилки, достигается малая ширина реза, чистая поверхность кромок, высокая точность при очень сложных формах раскроя. Резко повышается эффективность бумагорезательного производства при переходе на лазерный раскрой бумаги и картона.

Большая часть неметаллических материалов обладает высокой поглощательной способностью излучения CO₂-лазера с длиной волны 10,6 мкм, коэффициент поглощения достигает 0,9. Излучение неодимового лазера поглощается в объеме, поэтому резка неодимовым лазером не эффективна.

При воздействии лазерного излучения на различные диэлектрики происходит выделение газов, сажи и аэрозолей в виде мелкодисперс-

ных частиц испаренного материала. Поэтому при быстром испарении материала под воздействием лазерного излучения образуется эрозионный факел, который экранирует обрабатываемую поверхность, вызывает поглощение излучения и снижает интенсивность процесса нагрева. При этом механизм экранировки разный при обработке металлов и неметаллов. При воздействии на металлы плотностей мощности $10^6 \dots 10^7$ Вт/см² экранировка образуется в парогазовой среде. При обработке неметаллов в этом же диапазоне плотностей мощности экранировка излучения происходит в значительно большей степени за счет образования эрозионного факела.

Для устранения влияния эрозионного факела, с целью повышения эффективности резки в зону взаимодействия излучения с материалом, подается активный или нейтральный газ для удаления испарившихся частиц и плазмы. При резке большинства диэлектриков для поддува используют сжатый воздух. Применение инертных газов не эффективно. Применение кислорода приводит к обгоранию кромок реза.

Глубина реза зависит от мощности лазера, однородности пучка и скорости реза (рис. 3.18, 3.19). Поэтому рекомендуется использовать лазерное излучение с равномерным или гауссовым распределением плотности мощности. Также необходимо учитывать, что температуропроводность неметаллов очень низкая

$\alpha \sim 10^{-3}$ см²/с. Некоторые материалы (стеклопластик, керамика) могут рассеивать свет. Некоторые материалы термически хрупкие, т. е. раскалываются.

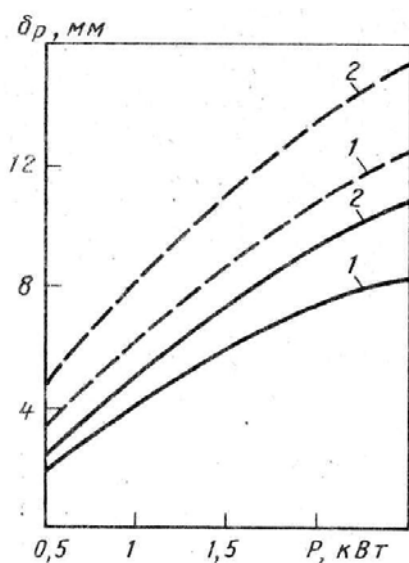


Рис. 3.18. Зависимость глубины реза от мощности излучения при скорости $V = 10$ мм/с и $F = 160$ мм: 1 – стеклотекстолит; 2 – гетинакс; --- однородный пучок; — неоднородный пучок

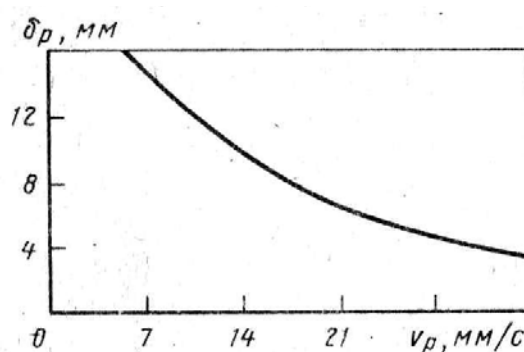


Рис. 3.19. Глубин реза стеклотекстолита от скорости реза CO_2 -лазера с мощностью 2 кВт

Кварцевое стекло. Оно имеет высокую теплопроводность λ_T и низкий коэффициент температурного расширения. Кварцевое стекло не трескается и режется, как металл. Удельная энергия разрезания $H_{разр} = 45$ кДж/г.

Оргстекло режется достаточно легко. Традиционный термический метод – резка раскаленной проволокой. Лазерная резка превосходит по скорости и качеству на порядки, но уступает по глубине реза. Глубина реза h при лазерной резке сильно зависит от формы каустики пучка (растет с увеличением фокусного расстояния ТО при равных интенсивностях излучения). Например, при $P_o = 200$ Вт (СО₂-лазер) и $f = 250$ мм, $h = 30$ мм.

Обычное стекло. Обычное листовое стекло при лазерной резке раскалывается. Этого избегают предварительным нагревом листа до ~ 600 °С. Резка производится с выдуванием расплава. В испарительном режиме энергозатраты возрастают и достигают 400 кДж/см³. Газолазерной резкой можно резать стекло толщиной $h = 4$ мм со скоростью 23 мм/с при $P_o = 400$ Вт. Существует второй способ резки – термораскалывание, когда лист стекла не подогревают. Луч лазера движется по поверхности с большой скоростью, а за лучом образуется трещина, движущаяся за ним. При этом энергозатраты обычно низкие, но способ является технологически очень сложным.

Резка слоистых пластиков.

Слоистые пластики – это, прежде всего, текстолит, стеклотекстолит и гетинакс. При их резке по краям реза может возникнуть зона обугливания $b_{з.о}$, (рис. 3.20). Качественный рез получается при определенных мощностях P_o и скоростях резки $v_{рез}$. Особые требования предъявляются к скорости потока газовой струи, которая может достигать скорости звука.

Резка древесины. При резке древесины наблюдаются те же закономерности. Для уменьшения обугливания лучше использовать струю углекислого газа.

В табл. 3.3 приведены режимы резания некоторых неметаллических материалов непрерывным СО₂-лазером.

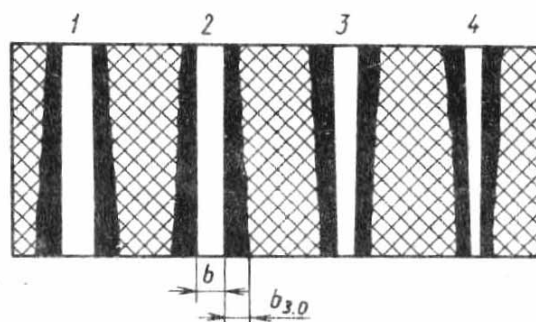


Рис. 3.20. Зависимость ширины реза и зоны обугливания стеклотекстолита толщиной $h = 5$ мм от скорости реза $v_{рез}$.
 $P = 2$ кВт. 1 – $v_{рез} = 6,6$ мм/с,
 2 – 16,6 мм/с, 3 – 25 мм/с, 4 – 33 мм/с

Таблица 3.3

Параметры резки различных материалов

Материал	P_o , кВт	h , мм	V_p , м/мин	ϵ , мм	Материал	P_o , кВт	h , мм	V_p , м/мин	ϵ , мм
Оргстекло	0,4	9,0	1,3		Стекло (обычн. лист)	0,2	3,0	0,006	1,8
	0,9	30	0,5			5,0	3,2	4,56	–
Вини-пласт	0,5	4,0	2,0	1,5	Стекло (термо- раскол)	0,015	2,5	0,1	–
Фанера	0,5	5,0	2,0	1,5	Кварцевое стекло	0,2	3,5	0,028	–
	0,85	6,4	5,4	–		0,5	3,2	0,72	–
Стекло- ткань	0,8	0,8	6,5	1,0	Стекло- текстолит	2,0	7,0	1,0	0,55
	4,0	10	3,0	2,0		2,5	8,0	1,0	–
	0,8	5,0	0,75	–					

3.5. Размерная обработка

К размерной обработке относится прошивка отверстий и создание углублений на поверхности материала. Все операции обычно проводят с помощью импульсных лазеров. Данная технология применяется для создания подшипников, фильер, перфорирования, скрайбирования, изготовления диафрагм малого размера. Считается экономически выгодным изготовление отверстий диаметром $d < 1$ мм. При диаметре $d > 1$ мм более эффективными становятся традиционные способы сверления. Поскольку сверление отверстий лазером возможно в любых материалах, то наиболее эффективно применение лазера для сверления труднообрабатываемых другими методами материалов (алмаз, рубин, керамика и т. д.), получения отверстий диаметром менее 100 мкм в металлах, сверления под углом к поверхности и т. д. Как правило, для этой цели используют импульсные твердотельные и CO_2 -лазеры с энергией в импульсе 0,1...30 Дж при длительности 0,1...1 мс, плотности потока излучения в зоне обработки 10 МВт/см² и более. Возможно сверление сквозных и глухих отверстий с различными формами поперечного (круглые, треугольные и т. д.) и продольного (цилиндрического, конического и др.) сечений. Освоено сверление отверстий диаметром 0,003...1 мм при отношении глубины к диаметру 0,5...10. Шероховатость поверхности стенок отверстий, в зависимости от режима обработки и свойств материала, соответ-

ствуется 6...10 классам чистоты ($\nabla 6... \nabla 10$), а глубина структурно измененного, или дефектного, слоя составляет 1...100 мкм.

Существует два режима сверления – одиночными импульсами и в импульсно-периодическом режиме. Рассмотрим особенности этих режимов.

Сверление отверстий одиночными импульсами. При сверлении отверстий за один импульс с большой энергией (до 30 Дж) достигается максимальная производительность. При этом основная масса материала удаляется из отверстия в расплавленном состоянии под давлением пара, образовавшегося в результате испарения относительно небольшой части вещества. Однако точность обработки одноимпульсным методом невысокая (10...20 % от размера диаметра).

Важным параметром является отношение глубины h к диаметру d . При одиночном импульсе добиться больших значений h/d трудно, поскольку с увеличением h растет d и ухудшается качество отверстия.

Сверление отверстий в импульсно-периодическом режиме (ИПР) излучения. При воздействии на материал серии импульсов (многотильтпульсный метод) с относительно небольшой энергией (обычно 0,1...0,3 Дж) и малой длительностью (0,1 мс и менее) достигается максимальная точность (1...5 %) и управляемость процессом сверления. В случае импульсно-периодического режима сверления лунка растет в глубину постепенно в результате послойного испарения материала каждым импульсом. Глубина h определяется суммарным действием (суммарной энергией) всей серии импульсов, а диаметр d параметрами отдельного импульса W_n и τ_n . Если импульс достаточно короткий, то

$$d = d_n + 2\sqrt{\alpha\tau_n} \approx d_n, \quad (3.14)$$

а толщина снимаемого слоя мала. При этом не происходит растрескивания стенок отверстия, поскольку удаляемая масса мала. Особенно это важно при обработке хрупких материалов.

Получение отверстий в таких материалах, как алюминий, кремний, германий, цинк, молибден, рубин, керамика, алмаз и т. д. в ИПР реально при диаметре отверстия $d = 4...100$ мкм и с соотношением $h/d > 50...100$.

Для получения отверстий большого диаметра ($d > 1$ мм) необходимо формировать пучок в виде тонкого кольца нужного диаметра с толщиной нити кольца $t < 100$ мкм.

В табл. 3.4 приведены ориентировочные режимы получения отверстий с помощью лазерных технологий.

Таблица 3.4

Параметры сверления отверстий в различных материалах

Материал	Толщина, мм	Диаметр отверстия, мм	Энергия в одноимпульсном режиме, Дж	Энергия в многоимпульсном режиме, Дж	Длительность импульса, мс	Число импульсов и в многоимпульсном режиме
Бронза, сплавы на основе Al и Cu	0,1	0,02...0,05	0,1...0,2	0,05	0,1...0,5	2...4
	0,5	0,05...0,1	0,7...1,5	0,2	0,1...0,5	4...8
	1	0,2...0,3	3...5	0,5	0,1...0,5	6...10
	5	0,5...1	30...100	10	0,1...0,5	5...10
Стали, железо-никелевые сплавы	0,1...0,2	0,02...0,1	0,1...0,5	0,05...0,1	0,1...1	3...5
	0,3...0,6	0,03...0,2	0,2...1,5	0,05...0,1	0,1...1	5...15
	1...2	0,1...0,6	2...10	0,5...1	0,1...1	5...10
Тугоплавкие металлы и сплавы	0,1	0,01...0,02	0,1	0,05	0,1...1	2...3
	0,5	0,03...0,2	0,5...4	0,1...0,5	0,1...1	5...10
	1	0,1...0,2	5...10	1	0,1...1	5...10
Ферритовые пластины	1	0,2	1,6	0,3	0,1...1	7
Часовые рубиновые камни	0,36	0,04...0,09	5...11	0,1	0,1...1	50...10
	0,4	0,01				0
Алмазные волокна для протягивания проволоки	1	0,05...0,4	2...5	0,5...2	0,5	100
	3	0,8	...	2...3	0,6	550

3.6. Другие технологические применения лазеров

3.6.1. Лазерный дальномер

В простейшем дальномере (рис.3.21) используется импульсный лазер. Его идея заключается в послыке светового импульса на удаленный объект и регистрация ответного отраженного сигнала. Если передатчик и приемник совмещены в пространстве, то расстояние до объекта

$$Z = \frac{c \cdot t_3}{2}, \quad (3.15)$$

где t_3 – время запаздывания ответного импульса. Ошибка измерения определяется как

$$\Delta Z = \frac{c \cdot \Delta t_3}{2} \quad (3.16)$$

Основная ошибка возникает при погрешностях измерения t_3 и определяется фронтом лазерного импульса $\Delta t_3 = \tau_\phi$. При длительности импульса $\tau_u = 10^{-8}$ с и фронте импульса $\tau_\phi = 10^{-9}$ с ошибка измерения расстояния $\Delta Z = 10^{-9} \text{ с} \cdot 3 \cdot 10^{10} \text{ см/с} = 30 \text{ см}$.

Преимуществом лазерного дальномера является высокая направленность пучка и, соответственно, мощный ответный импульс, который легко регистрируется с очень удаленных объектов. В силу малых значений τ_ϕ и τ_n точность измерения исключительно высока.

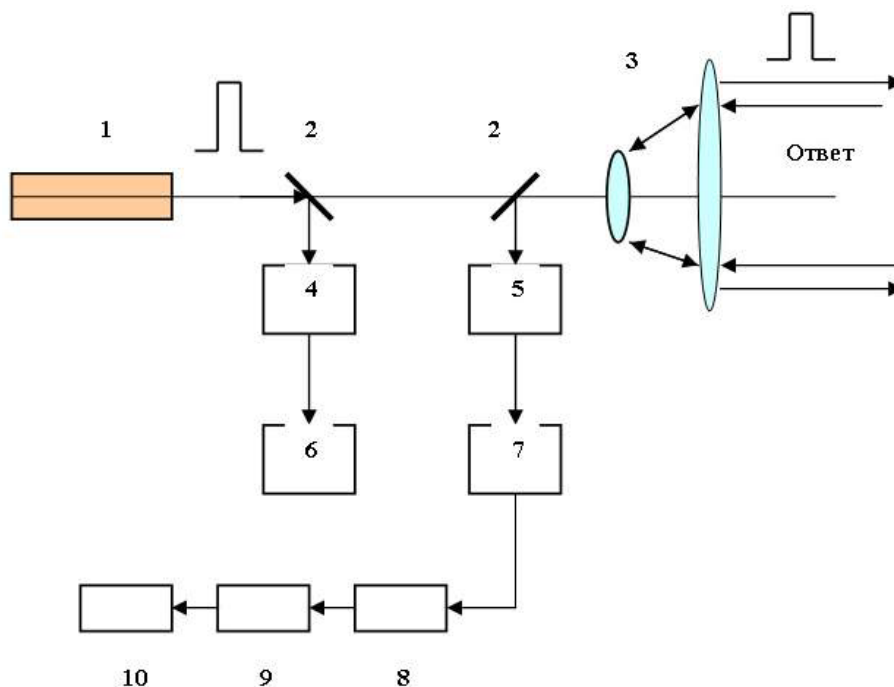


Рис. 3.21. Упрощенная схема лазерного дальномера:
 1 – лазер; 2 – расщепители пучка; 3 – телескоп; 4, 5 – фильтры; 6, 7 – ФЭУ;
 8 – усилитель; 9 – блок измерения; 10 – индикатор

Существуют фазовые дальномеры. Они более сложны. В них измеряется разность фаз между опорным и ответным сигналами. Если набег фазы больше 2π , то ответ не однозначен. Обычно измеряется фаза масштабной частоты, с которой модулируется излучение на выходе непрерывного лазера.

Лазерный локатор измеряет дальность до цели L , угол места φ и азимут ω , а также скорость движения цели $v_{ц}$. Лазерный локатор имеет преимущества перед радиотехническим, так как направленность его пучка $2\varphi_o = \frac{2,44\lambda}{D_{тел}}$, где $D_{тел}$ – диаметр главного зеркала телескопа (антенны) на несколько порядков выше любого другого излучения.

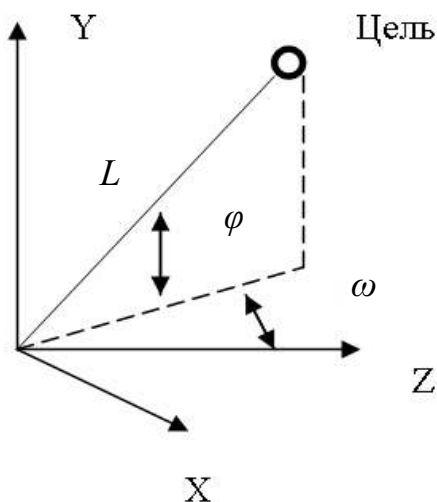


Рис. 3.22. Схема измерения параметров цели с помощью лазерного локатора

Антенна нужна маленькая и может быть установлена на самолете или танке, что исключительно важно. Углы φ и ω отсчитываются с помощью датчиков на антенне, которая следит за целью по ответному сигналу (рис.3.22). Скорость цели v_c может измеряться по доплеровскому смещению частоты.

Для обнаружения цели лазерный локатор может снабжаться радиотехническим локатором. Очевидно, что лазерный локатор может строить изображение цели и распознавать ее.

3.6.2. Лазерные установки военного назначения

Это, прежде всего, дальномеры и локаторы, лазерные системы связи, навигационные системы, лазерное оружие.

Дальномер может быть выполнен в виде зрительной трубы, установлен на танке и соединен с прицелом. В этом случае вероятность попадания (поражения цели) резко увеличивается. То же при установке на истребителе-бомбардировщике (обстрел ракетами воздух-земля и т. д.).

Системы наведения и целеуказания выгодно отличаются от ракет самонаведения с инфракрасными головками, так как ракета движется на выбранную лазером цель и идет только на излучение «своего» лазера. Так могут наводиться ракеты, бомбы, торпеды. Система наведения может следить за ракетой и управлять ее полетом.

Лазерная связь (например, лазерные радиации для пехоты).

Лазерное оружие:

1. Поражение глаз. Оно наступает при энергии импульса $W_o = 1$ Дж при $\tau_n = 10^{-9} - 10^{-8}$ с при облучении всего корпуса человека (или головы).
2. Тренажеры стрельбы и имитаторы. На цели (танк) устанавливается приемник излучения (фотодиод). Лазер совмещен с прицелом. При попадании сигнал с фотоприемника запускает сигнализатор попаданий (свет, звук, дым и т. д.).
3. Лазерная пушка.

Основное преимущество лазерного оружия – скорость поражающего фактора – 300 000 км/с ($3 \cdot 10^8$ м/с). Нет упреждения, и цель не имеет возможности маневра.

Обычно лазерная система состоит:

- из поискового локатора;
- точного лазерного локатора;
- мощного лазера на платформе автоматического сопровождения цели и оптической системы с переменным фокусным расстоянием;
- вся работа обеспечивается с ЭВМ на командном пункте.

Лазер может работать в непрерывном режиме и в режиме одиночного импульса. В первом случае мощность P_o достигает $10^6 \dots 10^8$ Вт. Во втором случае энергия излучения W_o должна составлять $10^5 \dots 10^7$ Дж при $\tau_n \sim 10^{-3} \dots 10^{-2}$ с. Диаметр пятна фокусировки:

- $d_n \sim 100$ см при $Z_y \sim 10^4$ км;
- $d_n \sim 10$ см при $Z_y \sim 10^3$ км;
- $d_n \sim 1$ см при $Z_y \sim 10 \dots 100$ км;
- $q_o \sim 10^5 \dots 10^6$ Вт/см².

Платформа с лазером может быть установлена на спутнике. В этом случае лазер должен вести боевые действия автономно (самостоятельно). В этом случае эффективным может быть импульсный химический лазер (например, HF-лазер). Лазер может быть наземным, а на платформе установлена фокусирующая система (адаптивное зеркало). Здесь возможно применение непрерывного CO₂-лазера. Основная задача – разрушить ракеты противника (баллистические) на старте.

3.6.3. Лазерная связь

Количество передач в одном канале связи зависит от несущей частоты, на которой идет связь:

$$N = \frac{\nu_o}{\Delta f}, \quad (3.17)$$

где ν_o – несущая частота; Δf – полоса частот полезного сигнала (передачи).

Полоса частот для некоторых передач:

- $\Delta f = 10 \dots 100$ Гц – речь;
- $\Delta f = 10^4$ Гц – музыка;
- $\Delta f = 10^6$ Гц – телевизионная полоса;

В одном лазерном канале связи можно уместить:

- $N = 10^{13}$ – телефонных разговоров;
- $N = 10^8$ – телепередач.

Это первое преимущество оптических систем связи по сравнению с радиотехническими системами, где количество передач на 6...7 порядков меньше. Вторым преимуществом является абсолютная защищенность от электрических и электромагнитных помех. В открытых системах связи это достигается высокой направленностью лазерного пучка и

монохроматичностью излучения (угловая и спектральная селекция). В закрытых системах (оптоволоконных) – невозможностью проникновения помехи в волокно. Кроме того, работа канала здесь не зависит от атмосферных условий.

В оптических волокнах возможно затухание (ослабление) сигнала ($\sim 1 \dots 10$ дВ/км), поэтому при передаче сигнала на большие расстояния необходимы ретрансляторы. На рис. 3.23 показана трехканальная линия связи с ретранслятором.

Вместо 4, 5, 6, можно поставить оптический усилитель, тогда электрический сигнал ретранслятора – это обычный источник питания.

Пучок лучей в волокне обычно имеет модовую структуру (если вводится пучок лазера). Моды формируются в результате интерференции. По числу распространяющихся мод волокна различают:

- многомодовые ($d_c > 10\lambda_o$; λ_o – длина волны);
- одномодовые ($d_c < 10\lambda_o$; $d_c > 2\lambda_o$).

Устойчивый модовый состав формируется на расстоянии около 1 м от входного торца.

Различают волокна со ступенчатым и плавным изменением показателя преломления. Последние волокна называют градиентными.

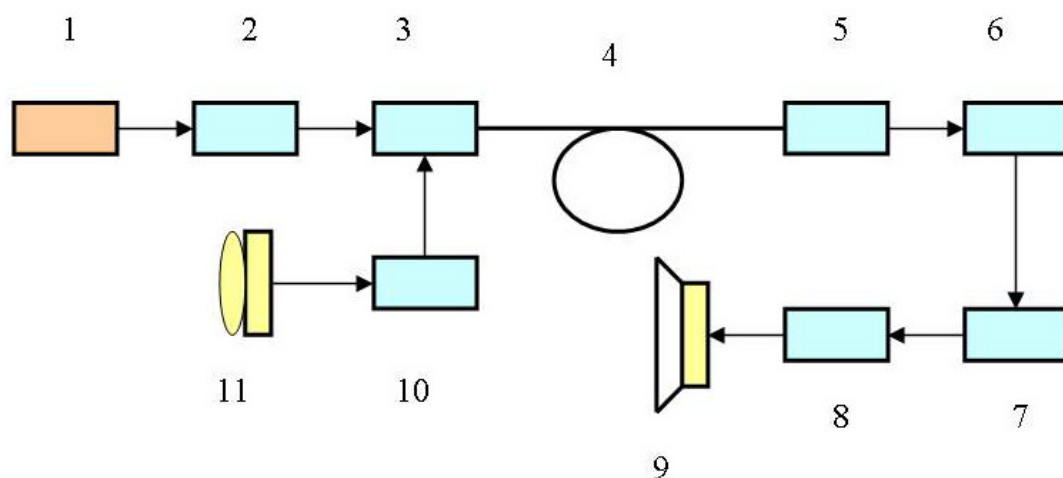


Рис. 3.23. Простейшая схема канала связи:

1 – лазер; 2 – модулятор; 3 – узел ввода в волокно; 4 – оптическое волокно; 5 – оптический усилитель; 6 – фотодетектор; 7 – демодулятор; 8 – усилитель НЧ; 9 – динамик; 10 – управление модуляцией; 11 – микрофон

Градиентные световоды не только передают световой поток, но и строят изображение источника за выходным торцом. Числовая апертура для ступенчатых кварц-полимерных световодов – $A \approx 0,18 \dots 0,23$, а для градиентных – $A \approx 0,13 \dots 0,18$.

Условие ввода пучка лучей в световод

$$\Omega_0 \leq \Omega_c, \quad (3.18)$$

где Ω_0 – габаритный фазовый объем пучка; Ω_c – габаритный фазовый объем волокна (световода).

При прохождении импульса света по волокну за счет дисперсии может изменяться его временная форма. Причиной является различная длина оптического пути для различных частот пучка.

Дисперсия ограничивает верхнюю частоту передачи информации (скорость передачи). В грубом приближении при $\tau_0 \rightarrow 0$

$$f_{\text{верх}} \sim \frac{1}{\tau_1}. \quad (3.19)$$

$$\text{В многомодовом режиме } \left\{ \begin{array}{l} \tau_1 \approx 20 \dots 50 \text{ нс/км} \\ f_{\text{верх}} \approx 100 \text{ МГц/км} \end{array} \right\}.$$

$$\text{В одномодовом режиме } \left\{ \begin{array}{l} \tau_1 = 1 \dots 2 \text{ нс/км} \\ f_{\text{с}} > 1 \text{ ГГц/км} \end{array} \right\}.$$

Потери излучения в волокне возникают из-за поглощения, рассеяния, конверсии мод и их вытекания. Потери измеряются в децибелах:

$$X = 10 \lg \frac{P_0}{P_1}, \quad (3.20)$$

где P_0 – мощность на входе; P_1 – мощность на выходе.

Поглощение может быть собственным и примесным. Рассеяние возникает на неоднородностях. При высоких интенсивностях возможно вынужденное рассеяние (ВКР и ВРМБ) даже в непрерывном режиме при следующих интенсивностях:

$$P_0 \sim 2,5 \text{ Вт} - \text{ в многомодовых;}$$

$$P_0 \sim 100 \text{ мВт} - \text{ в одномодовых.}$$

Кварцевые и стеклянные волокна применяются в диапазоне длин волн $\lambda_0 = 0,6 \dots 1,6$ мкм.

Потери в этих волокнах $X = 1 \dots 10$ дБ/км

Волокна полимерные $X = 20 \dots 100$ дБ/км.

Волокна из галоидных, оксидных халькогенидных стекол используются для длины волны $\lambda_0 = 2 \dots 10$ мкм, а их затухание – $X \approx 0,1$ дБ/км.

Волокна можно состыковывать, предварительно обработав торцы (методом скола или полировки). Кварцевые волокна можно сваривать. При сварке и хорошей полировке потери на стыке $X < (0,1 \dots 0,001)$ дБ.

На практике скорость передачи на 1990 г. была следующей:

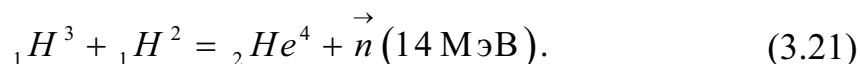
- 120 Мбит/с – многомодовое волокно;
- 8 Гбит/с – градиентное ($d_c = 50$ мкм);
- 40 Гбит/с – одномодовое ($d_c = 5$ мкм).

Мощность п/п-лазеров 0,8...2,5 Вт.

Срок службы полупроводникового лазера в системах передачи составляет 110...120 тысяч часов.

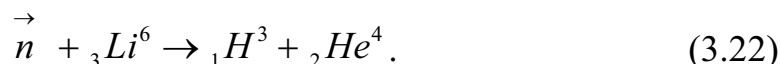
3.6.4. Лазерный управляемый термоядерный синтез

Лазерный управляемый термоядерный синтез является в настоящее время одним из альтернативных методов для решения в будущем проблемы энергетики. Основная реакция термоядерного синтеза (ТС) заключается в синтезе молекул дейтерия и трития:



При этом выделяется большая энергия. Дейтерий в природе есть, а тритий необходимо получать искусственным путем. Содержание дейтерия в тяжелой воде мало, но, тем не менее, в 30 л воды имеется энергия, эквивалентная 20 т угля.

Тритий получают из лития через реакцию



Для осуществления ТС необходима высокая температура T , высокая плотность вещества n и малое время удержания τ . Соотношение между этими величинами выражается условием Лоунса:

$$\left\{ \begin{array}{l} T - 10^8 \text{ К} \\ n \cdot \tau - 10^{21} \frac{\text{с}}{\text{м}^3} \end{array} \right\}, \quad (3.23)$$

где n – плотность атомов (количество атомов в м^3). Графическое изображение этого условия представлено на рис. 3.24. Заштрихованная область удовлетворяет условию синтеза. Примерный подход к этим условиям двумя путями (лазерный (ЛТС) и на основе токамаков) отображен областями, ограниченными сверхплотными линиями.

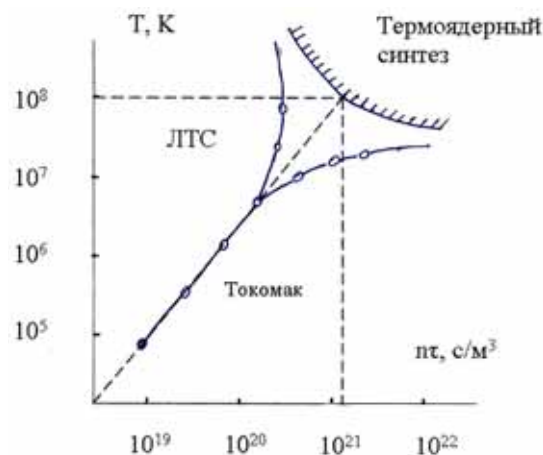


Рис. 3.24. Условия реализации термоядерного синтеза

Разогрев и удержание плазмы с помощью лазерного пучка осуществляется следующим образом. Берется сферическая мишень. Это может быть стеклянный или металлический полый шарик, наполненный смесью дейтерия и трития. Мишень облучается лазерным пучком со всех сторон равномерно при интенсивности

$$I_0 \approx 10^{14} \dots 10^{16} \text{ Вт/см}^2.$$

Облучение мишени производится в вакууме.

Схема лазерной установки приведена на рис. 3.25.

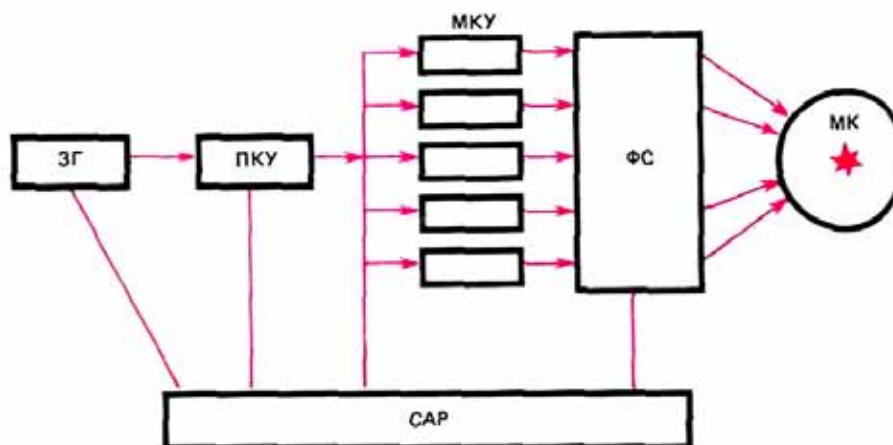


Рис. 3.25. Схема мощной лазерной установки:

ЗГ – задающий генератор; ПКУ – предварительные каскады усиления; МКУ – многоканальный каскад усиления; ФС – фокусирующая система; МК – мишенная камера; САР – система автоматического регулирования

Обычно мишень представляет собой сферическую ампулу, содержащую несколько миллиграммов дейтериево-тритиевой смеси в виде льда (при температуре ниже 14 К) или газа под давлением до сотен атмосфер. Радиус мишени обычно составляет порядка 0,1...0,2 мм. Ампула окружена несколькими оболочками. Внутренние оболочки и экраны предохраняют содержимое от перегрева; внешняя, испаряясь под действием лазерного импульса, разлетается и создает реактивный импульс, который, складываясь со световым давлением, сжимает содержимое мишени. Лазерные импульсы, имеющие мощность порядка 10^{14} Вт, фокусируются на мишени симметрично со всех сторон. Оболочка ампулы за время, гораздо меньшее длительности импульса, испаряется, ее вещество ионизируется и превращается в плазму (так называемую корону), которая разлетается со скоростью до 1000 км/с. Лазерное излучение взаимодействует с плазмой по очень сложным законам и нагревает ее. Энергию из короны переносят в плотные слои мишени «горячие» электроны. Тепловой поток испаряет и нагревает новые слои оболочки, в результа-

те чего вся энергия лазерного импульса превращается в тепловую и кинетическую энергию разлетающегося вещества. Его отдача и тепловое давление создают на границе испарения импульс сжатия более 10^6 атмосфер. Плотность вещества в периферийной части мишени возрастает до $10^2 \dots 10^3$ г/см³, а в центральной части – до $5 \dots 50$ г/см³. При этих условиях во всей массе дейтериево-тритиевой смеси возникает термоядерная реакция. Тепло, полученное в ходе реакции, может быть преобразовано в электроэнергию или использовано непосредственно. Но для получения энергии необходимо построить промышленный лазерный термоядерный реактор, а на пути его создания имеется ряд технологических трудностей.

Согласно оценкам, лазеры должны иметь КПД не ниже 5 % при энергии излучения $1 \dots 3$ МДж, длительности импульсов $(2 \dots 3) \cdot 10^{-9}$ секунды и частоте их повторения $1 \dots 10$ Гц. Лазеры должны стоять на расстоянии $30 \dots 50$ метров от реактора и обеспечивать фокусировку излучения на мишень размером в 1 сантиметр. Неоднородность интенсивности облучения мишени не может превышать 5 %, а сама мишень должна быть изготовлена с точностью до 1 %. Мишени – ампулы с дейтериево-тритиевой смесью нужно подавать в реактор несколько раз в секунду, с высокой точностью фиксируя их в центре реактора. Только при выполнении всех этих условий коэффициент усиления реактора (отношение выделившейся термоядерной энергии к энергии лазеров) может достигнуть $10^2 \dots 10^3$. Но сконструировать столь сложную систему с таким количеством серьезных требований пока не удастся.

Гибридный реактор как альтернатива чисто лазерного реактора, который наряду с электричеством и теплом может производить плутоний и тритий. Такой реактор (термоядерная печь) представляет собой дейтериево-тритиевую мишень, окруженную двумя сферами. Первая сфера содержит топливо (уран-238), во второй (внешней) сфере содержится литий (рис. 3.26). В таком реакторе термоядерная энергия может составлять лишь часть от полной энергии, при этом могут существенно снизиться требования к лазерным пучкам.

Десять раз в секунду камера с мишенью должна загружаться внутрь первой сферы и «обстреливаться» лазерным пучком. В результате реакции термоядерного синтеза выделяется поток *нейтронов*, который поглощается *первой* сферой. Уран-238 сгорает, а выделенное топливо через теплообменник нагревает воду, обеспечивающую работу электро-

станции. Нейтроны, прорывающиеся во *вторую* сферу, обеспечивают воспроизводство *триния*. Расход U^{238} – порядка 2-х тонн в год.

При мощности лазера (средней) $P_o = 10^6$ Вт и КПД 1 % мощность блока питания (потребляемая мощность) составляет 10^8 Вт. Мощность при делении ядер урана $\sim 2,5 \cdot 10^9$ Вт. При КПД турбины ~ 40 % полезная мощность $P \sim 10^9$ Вт.

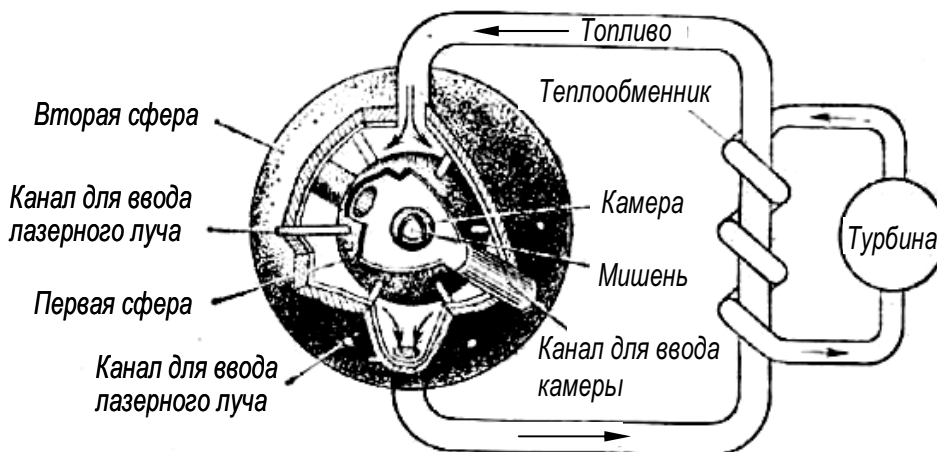


Рис. 3.26. Схема гибридного реактора

Часть этой мощности ($\sim 10^8$ Вт) затрачивается на работу лазерной установки, а остальная мощность $P_{\text{потр}} \approx 9 \cdot 10^8$ Вт может использоваться потребителем.

Много ли это? Для сравнения напомним, что блок атомной электростанции имеет мощность $P_{\text{ат}} \approx 10^8$ Вт, т. е. гибридный реактор может развивать мощность, равную 9-ти черновыльским блокам.

Раздел 4

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

4.1. Классификация и характеристики ЛТК

Лазерные технологические установки (ЛТК) разделяются на специализированные и универсальные. Специализированные ЛТК предназначены для обработки одной детали. Как правило, это автоматизированные ЛТК (АЛТК). В них нет ничего лишнего, и вся вспомогательная оснастка нацелена на одну операцию. Специализированные АЛТК выгодны при массовом производстве, например на автозаводах. Так, например, в СССР на АЗЛК был внедрен специализированный ЛТК для термоупрочнения опорных поверхностей корпуса коробки дифференциала заднего моста автомобиля «Москвич». В АЛТК был использован лазер «Кардамон» и манипулятор изделия, что позволяло обрабатывать до 1200 деталей в сутки. Такого типа ЛТК работают на фирме «ФИАТ» (сварка шестерен, лазер «Спектра-Физикс-913»), «Даймлер Бенц» (сварка гидравлических толкателей клапанов) и во многих других производствах. Существуют даже ЛТК для пробивки отверстий в детских сосках (лазер фирмы «Когерент», 150 Вт, 80 Гц, производительность 10 тысяч отверстий в минуту).

Универсальные ЛТК могут быть использованы как в массовом, так и в серийном производстве. Наибольшее число универсальных ЛТК разработано и выпущено фирмами ФРГ, США, Швейцарии, Японии. Подавляющее большинство их предназначено для резки материалов. В основном они выпускаются на базе СО₂-лазеров мощностью от 0,5 до 1,5 кВт (в последнее время твердотельные начинают теснить), но имеются на базе лазеров с мощностью до 10кВт. Для обработки плоских деталей АЛТК имеют 2...3 степени свободы, а для объемных – 5...6 степеней свободы. Габаритные размеры рабочей зоны достигают 7000 мм, при этом точность позиционирования составляет 0,08 мм. Иногда точность позиционирования достигает 0,01мм на базовой длине 3000 мм, однако точность обработки на порядок ниже. Максимальные скорости обработки АЛТК находятся на уровне 10...15 м/мин. В некоторых комплексах они достигают 60...80 м/мин.

Конструкция и возможности ЛТК определяются типом манипулятора детали и оптики. По этому признаку ЛТК разделяются:

- на ЛТК с манипулятором изделий (оптика неподвижна, а манипулятор перемещает деталь);

- ЛТК с манипулятором оптики (деталь неподвижна, а оптика движется);
- ЛТК смешанного типа (подвижными являются и оптика, и деталь);
- ЛТК с манипулятором изделий могут быть выполнены на базе двух координатных систем, ротационных и систем смешанного типа.

Комплексы на базе двух координатных столов позволяют проводить сварку, резку и термоупрочнение (рис. 4.1). Обычно рядом со столом устанавливается стойка с консолью, на которой закреплен вертикальный манипулятор, который перемещает оптическую фокусирующую головку по оси Z. Стол перемещает деталь по осям X и Y. Лазер укрепляется непосредственно за стойкой, и длина оптического тракта минимальна. Комплексы обеспечивают высокую точность. Целесообразно их использовать при габаритных размерах рабочей зоны до 1 000 мм. Деталь движется по рейке 2, в направлении Y; рейка 2 движется по рейке 3 в направлении X.

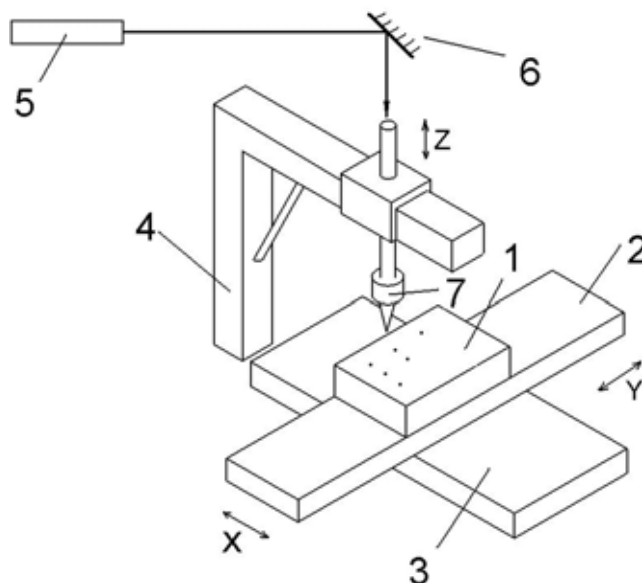


Рис. 4.1. Схема ЛТК с манипулятором изделия – двух координатным столом:
 1 – деталь; 2 – подвижная рейка;
 3 – неподвижная рейка; 4 – консоль; 5 – лазер;
 6 – поворотное зеркало;
 7 – подвижная (по оси Z) головка

Ротационные системы предназначены для обработки валов, труб, втулок, дисков. Деталь вращается в различных направлениях с различной скоростью. Излучающая головка с объективом движется в направлении Z. Системы со сложным перемещением могут быть выполнены комбинацией двухкоординатного стола и ротационной системы или в варианте робота – манипулятора изделия (рис. 4.3).

Такие роботы достаточно хорошо отработаны.

Недостатки ЛТК с манипулятором изделий:

- перемещение крупных листов занимает большие площади;
- тонкие листы и валы могут вибрировать при больших скоростях;
- массивные детали перемещать сложно.

Наиболее распространены двухкоординатные порталные (мостовые) системы для плоской обработки, при которой деталь и лазер неподвижны, а перемещается оптика («летающая оптика»).

Схема ЛТК с манипулятором оптики – двухкоординатным порталом приведена на рис. 4.2.

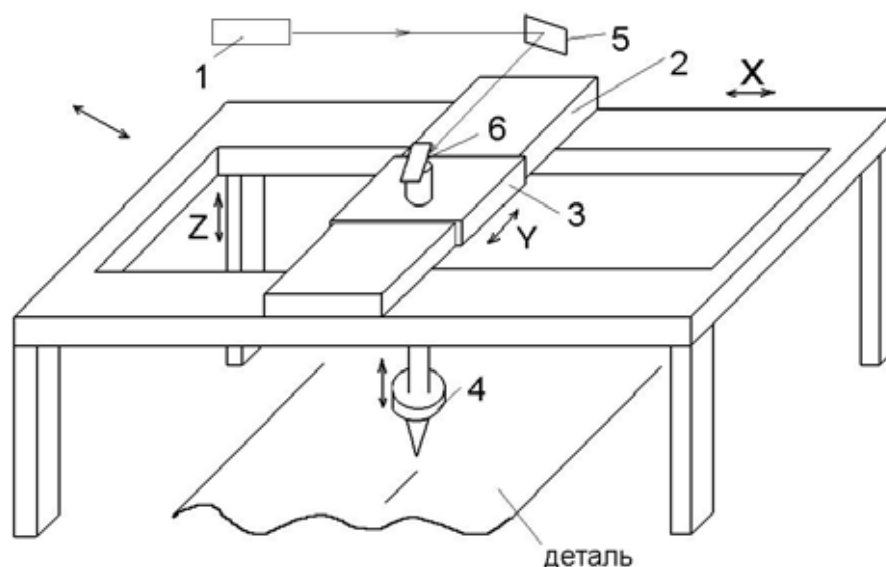


Рис. 4.2. Схема ЛТК с манипулятором оптики – двухкоординатным порталом:

1 – лазер; 5 – зеркало, закрепленное на поперечной планке 2; 4 – оптическая головка с объективом; 6 – зеркало, закрепленное на портале 3

Планка 2 движется по оси X, а портал 3 – по оси Y (вдоль планки). Объектив перемещается по оси Z. Преимущества:

- высокая скорость обработки – до 100 м/мин;
- высокая точность обработки – оптика легкая;
- возможность обработки деталей больших габаритных размеров.

Главный недостаток такой системы – переменный оптический тракт. Необходимы жесткие требования к лазерному пучку. Основное назначение систем – резка листового материала.

В порталной системе возможна установка лазера на портале. В этом случае достигается минимальная длина оптического тракта, которая не меняется в процессе работы. Но она рассчитана на лазеры малой мощности (малых габаритов и массы) и при мощностях выше 500 Вт работа конструктивно невозможна, т. е. ее применение ограничено.

Системы с вращением оптики и неподвижной деталью применимы в тех случаях, когда луч по изделию перемещается на достаточно малые расстояния. Это является эффективным в ЛТК, предназначенных для маркировки.

К системам со сложной траекторией оптики следует отнести роботы-манипуляторы оптики. Они имеют преимущество перед другими типами, поскольку легко встраиваются в автоматизированные линии. Существуют две принципиально разные системы соединения лазера и робота:

- хват стандартного робота перемещает гибкий лучепровод из оптического волокна;
- луч проходит внутри лучепровода, содержащего несколько зеркал на шарнирах (рис. 4.3).

Первая схема удобна, но в ней передаваемая мощность обычно не превышает пока 500 Вт. Причем для каждого диаметра волокна (кварцевое, хлористый калий, селенид цинка) она своя. Например, пропускание кабеля длиной 10 м составляет $\sim 90\%$. Недостаток первой схемы – происходит увеличение инварианта пучка на выходе до 1,5...2 раз.

При реализации системы лучепровода с шарнирными зеркалами передаваемая мощность повышается до нескольких кВт, но при этом предъявляются высокие требования к механике лучепровода. Перспективны схемы, где плечо робота находится вне лучепровода. Обычно робот может перемещать оптическую головку в пределах рабочей зоны объемом до 1 м^3 со скоростью до 2 м/мин и точностью позиционирования до 0,05 мм.

На рис. 4.3. приведена схема автоматизированного ЛТК лазер-робота, в которой управление лучем по требуемой траектории осуществляется с компьютера.

Основные требования к АЛТК: лазер-робот это высокая надежность. АЛТК типа лазер-робот легко перенастраиваются на любую операцию.

ЛТК смешанного типа – это комбинации манипуляторов оптики с манипуляторами изделия. Например, система портал – координатный стол или портал – ротационная схема, где портал может быть как одно-, так и двухкоординатным. Дополнительные возможности дает усложнение траектории оптики за счет вращения оптической головки в двух направлениях. Перемещение по координате Z в системах для объемной

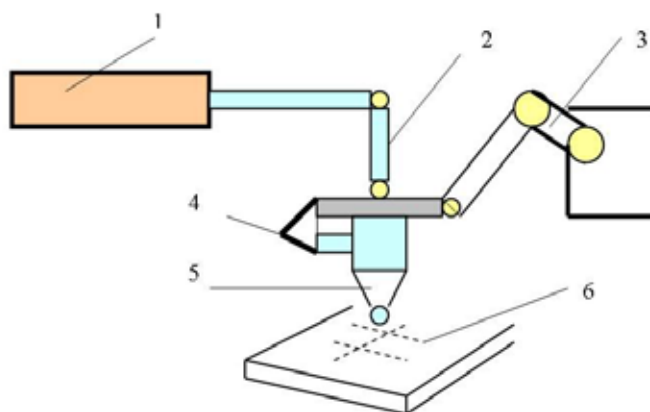


Рис. 4.3. Схема АЛТК лазер-робот:
1 – лазер; 2 – лучепровод; 3 – плечо робота;
4 – поворотные зеркала;
5 – оптическая головка; 6 – деталь

обработки большее, чем в ЛТК для плоской обработки. Кроме того, сопло объектива может перемещаться независимо. С помощью датчика постоянно отслеживается расстояние между поверхностью детали и соплом, и сигнал подается на привод. Это является шестой координатой, на которой перемещение составляет не более 15 мм. Она является самостоятельной координатой и позволяет делать резку волнистых листов, термообработку и пр.

Комбинированные ЛТК, кроме лазера, включают другие машины и инструменты, например вырубной пресс. Такая комбинация расширяет возможности и лазера, и прессы. Кроме резки лазер здесь может снимать заусеницы.

4.2. Тенденции и проблемы развития лазерного технологического оборудования

К основным тенденциям развития лазерного технологического оборудования можно отнести:

1. Комплектование ЛТК лазерами большой мощности с лучшими характеристиками.
2. Создание ЛТК в комбинации с другими агрегатами.
3. Увеличение выпуска комплектующих изделий, запчастей, оснастки.

Производство и сбыт. В 1986 году в странах Запада для обработки материалов продано свыше 2 тысяч лазеров. В 2000 году в США выпуск технологических газовых лазеров вырастет до 35 000 штук в год. В Японии в 1985 году выпущено 2000 технологических лазеров, 40 % из них СО₂-лазеры.

Экономические тенденции – снижение цен от 100...120 долл/Вт до 60...80 долл/Вт.

Использование. Основной потребитель лазерной техники – это фирмы в развитых странах (США, Япония, Германия). Освоены более 30 областей промышленного применения лазерных технологий. К основным можно отнести:

- металлообработка в разных отраслях производства;
- автомобилестроение, самолетостроение, кораблестроение;
- заготовительное производство для разных отраслей.

Причины медленного внедрения лазерного оборудования:

1. Высокая стоимость лазеров.
2. Высокая технология в эксплуатации (нет подготовленных кадров).
3. Конкуренция со стороны более дешевых и отработанных технологических процессов.
4. Слабая укомплектованность вспомогательной оснасткой.

Повышение эффективности использования ЛТК возможно путем:

- увеличения числа фирм по внедрению;
- улучшения сервисного обслуживания;
- создание крупных лазерных технологических центров.

4.3. Промышленные образцы ЛТК

4.3.1. Промышленные образцы ЛТК на базе твердотельных лазеров ($\lambda = 1,06$ мкм)

ЛТК на базе ЛТУ «Квант-9». Большое распространение для сверления отверстий (главным образом в алмазах) получила ЛТУ на базе лазера «Квант-9».

Оптическая схема ЛТУ приведена на рис. 4.4. Лазерный излучатель состоит из оптического резонатора, образованного зеркалами (1) и (3), и твердотельного активного элемента (2), изготовленного из стекла с неодимом. Элементы (4, 5, 13, 14 и 18) обеспечивают фокусировку лазерного излучения на обрабатываемые детали (21). Плоскопараллельная пластина (17) защищает объектив (18) от загрязнения испаряющимися из зоны обработки материала веществами.

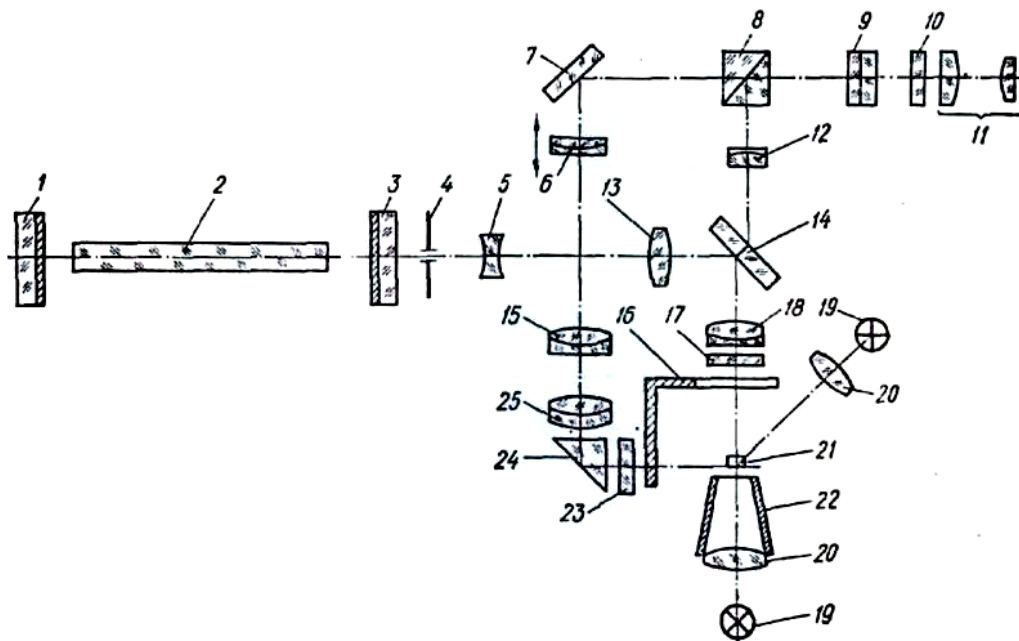


Рис. 4.4. Схема излучателя и оптической системы установки «Квант-9»:
 1, 3 – зеркала резонатора; 2 – активный элемент; 4 – диафрагма;
 5, 13 – телескопическая система; 6 – фокусирующий элемент; 7 – зеркало;
 8 – светоделительный куб; 9 – светофильтр; 10 – пластина с перекрестием;
 11 – окуляр; 12 – линза; 14 – интерференционное зеркало; 15, 25 – объектив;
 16 – заслонка; 17, 23 – защитные стекла; 18 – объектив; 19 – лампа; 20 – линза;
 21 – обрабатываемая деталь; 22 – полный фокус; 24 – призма

Для наблюдения за обрабатываемой деталью сверху служит микроскоп, состоящий из объектива (18), линзы (12), светофильтра (9), сетки с перекрестием (10) и окуляра (11). Для наблюдения за деталью сбоку используется второй микроскоп. В состав этого микроскопа входят защитное стекло (23), поворотная призма (24), объективы (25) и (15), подвижный фокусирующий элемент (6), зеркало (7). С помощью светоделительного куба (8) поле зрения второго микроскопа совмещено с полем зрения первого микроскопа, что позволяет использовать для наблюдения за деталью сбоку и сверху одни и те же элементы (9–11). Для освещения обрабатываемой детали служит лампа (19), линза (20) и конус (22). Заслонка (16) предназначена для переключения наблюдательных ветвей оптической системы. Установка позволяет обрабатывать зоны размеров 1...1000 мкм.

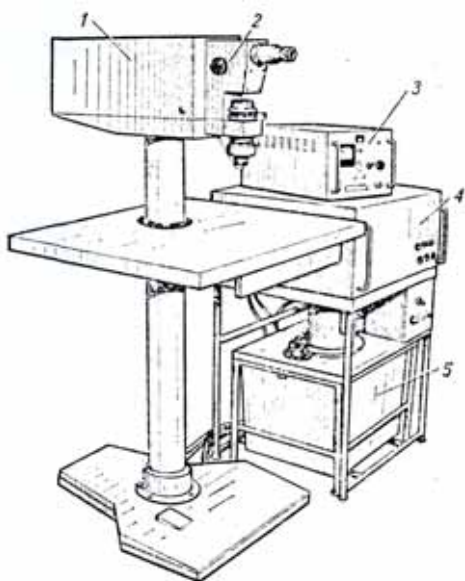


Рис. 4.5. Установка «Квант-9»:
 1 – излучатель; 2 – оптическая система; 3 – система управления;
 4 – источник питания;
 5 – система охлаждения

Внешний вид установки приведен на рис. 4.5. Она состоит из лазерного излучателя, оптической системы, источника питания, системы управления и системы охлаждения.

Для накачки активного элемента применена импульсная лампа ИФП-1200, напряжение на которую подается от источника питания ИП-1. В состав источника питания входят повышающий трансформатор и батареи накопительных конденсаторов емкостью 800 мкФ. Квант-9 производит импульс с энергией 10 Дж с длительностью 0,5 мкс.

Система управления СУМ-5 задает частоту следования разрядных импульсов, производит их счет, а также обеспечивает плавную регулировку и стабилизацию напряжения на накопительных конденсаторах в диапазоне от 200 до

2000 В.

ЛТК «Севан» создан на базе лазера ЛТН-103 (мощность лазера $P = 250$ Вт). Лазер размещен на портале. Комплекс позволяет разрезать листы размером 2000×2000 мм с максимальной скоростью 10 м/мин. Максимальная толщина разрезаемой стали 3 мм.

АЛТК фирмы «Рэйтон» ($P = 0,4$ кВт) снабжены гибкими световодами. Оптоволоконный кабель длиной 10 м. Используется робот марки Т-726. Режет стальные листы толщиной до 3 мм.

АЛТК фирмы «Люмоникс» (Канада) создан на базе лазера JK-707 с максимальной энергией в импульсе 100 Дж, τ_n – 0,5...20 мс, частота повторения импульсов 5...500 Гц. Средняя мощность – 1000 Вт, импульсная – до 10 кВт. АЛТК снабжен оптическим кабелем длиной до 10 м. Глубина проплавления до 3,3 мм при скорости до 1 м/мин. Раскрой тонких листов с манипулятором-роботом происходит со скоростью до 10 м/мин. Максимальная толщина: пробивка отверстий – до 75 мм; сварка – до 25 мм с шириной 0,1...2,5 мм; резка – до 20 мм с шириной 0,1...0,5 мм.

Лазерные технологические установки серии LRS.

Универсальные ЛТУ серии LRS, выпускаемые за рубежом, предназначены для выполнения технологических операций по прецизионной лазерной сварке, наплавке, поверхностного термоупрочнения. Отличительной особенностью использования лазерной сварки является локальный нагрев поверхности обрабатываемого участка детали, позволяющий расплавлять соединяемые детали в ограниченном объеме, не подвергая тепловому воздействию ближайшие части конструкции. Таким образом, геометрия свариваемых деталей остается практически неизменной. Хорошо себя зарекомендовал метод импульсного лазерного нагрева для локальной поверхностной закалки инструментальных сталей.

Возможности широкого диапазона регулирования параметров излучения ЛТК позволяют производить сварку и наплавку как на конструкционных сталях, так и цветных металлах и сплавах. Работы могут выполняться как на малогабаритных (10 × 10 × 10 мм), так и крупногабаритных (300 × 200 × 100 мм) деталях и узлах, весом до 100 кг. Установки серии LRS (рис. 4.6) включают в себя лазерный излучатель с системой фокусировки и наблюдения, источник питания с блоком охлаждения лазера, координатный стол с ручным приводом и пульт управления. Возможность плавного вертикального перемещения излучателя лазера по высоте в сочетании с трехкоординатным позиционированием свариваемых деталей расширяет инструментальную зону обработки и оперативность технологической перестройки под новые изделия. Наличие в составе установки оптической



Рис. 4.6. Внешний вид ЛТК серии RLS

контрольно-фокусирующей системы со стереоскопическим микроскопом позволяет производить точное позиционирование места сварки и контролировать выполнение технологических операций. Система наблюдения, в соответствии с медицинскими требованиями, оснащена устройством защиты глаз оператора от вспышки в момент сварки, что обеспечивает полную безопасность работ.

Таблица 4.1

Технические характеристики

Модель		LRS-100	LRS-150	LRS-200
Длина волны излучения, мкм		1,06		
Режим работы		Импульсно-периодический		
Энергия импульса излучения, Дж		до 40	до 60	до 80
Длительность импульса излучения, мс		0,2...20		
Частота следования импульсов излучения, Гц		От 0,5 до 20		
Средняя мощность излучения, Вт		до 100	до 150	до 200
Пиковая мощность излучения, кВт		4	6	8
Диаметр сфокусированного пучка, регулируемый, мм		От 0,3 до 2,0		
Расходимость, мрад		меньше 10		
Диапазон перемещения:	Стола X–Y, мм Излучателя Z1, мм Детали Z2, мм	250 × 150 до 200 до 300		
Охлаждение двухконтурное водно-водяное, расход водопроводной воды, м ³ /час		0,3	0,35	0,4
Стабильность энергии излучения, %		±2		
Увеличение микроскопа		16x		
Размеры оперативной зоны, мм		10		
Точность позиционирования, мкм		±20		
Напряжение питания		380/220 В, 50 Гц		
Потребляемая мощность, кВт		5	6	7,5
Габариты, мм		450 × 850 × 1100		
Вес, кг		150	160	180

Области применения ЛТК серии LRS:

- импульсная лазерная сварка:
 - импульсная лазерная шовная сварка сильфонов;
 - изготовление вытяжных пуансонов методом импульсной лазерной шовной сварки;
 - изготовление датчиков давления методом импульсной лазерной сварки;
 - заварка горячих и холодных трещин методом «холодной» лазерной сварки;

- импульсная лазерная наплавка:
 - восстановление изношенных пресс-форм, технологической оснастки методом лазерной импульсной наплавки;
 - восстановление лопаток турбин методом импульсной лазерной наплавки;
 - восстановление изношенных протяжек методом импульсной лазерной наплавки;
 - восстановление ленточных пил методом импульсной лазерной наплавки;
- импульсная лазерная пайка:
 - устранение негерметичности радиаторов методом лазерной пайки;
- импульсная лазерная термообработка:
 - лазерное упрочнение дисковых отрезных, прорезных фрез;
 - импульсная лазерная термообработка режущего инструмента;
- импульсная лазерная резка:
 - изготовление трафаретов методом импульсной лазерной резки;
 - изготовление прокладок с использованием технологии лазерной резки.

4.3.2. ЛТК на базе CO₂-лазеров

ЛТК на базе лазера «Кардамон». Специализированный комплекс был использован на АЗЛК для поверхностного упрочнения (мощность лазера $P = 800$ Вт).

Установка на базе лазера «Катунь-1» (мощностью 800 Вт) использовалась для раскроя текстиля. То же на базе лазера «Кардамон» (диффузионный). Скорость раскроя до 40 м/мин. Оптическая головка установлена на портале. Фокусное расстояние резака – 200 мм. Расходимость лазерного пучка $\sim 10^{-3}$ рад. Диаметр пятна – 0,4 мм.

АЛТК на базе лазера ТЛ-1,5 (Россия) для автоматизированной лазерной резки по сложному контуру. В состав комплекса входит лазер ТЛ-1,5 с поперечной прокачкой газа (одномодовый, с мощностью 1,5 кВт), манипулятор оптики портального типа. Перемещение оптической головки с помощью линейных двигателей. Рабочий ход по осям X, Y, Z составляет $2500 \times 1600 \times 80$ мм, точность позиционирования $\pm 0,025$ мм/м. Рабочая скорость резки до 10 м/мин. Предусмотрена система автоматизированной загрузки материалов. Имеется система вытяжки газов.

Роботизированный комплекс «Лазер флекс» (США) на базе CO₂-лазера «Спектра-Физикс» (мод. 820) с поперечной прокачкой газа мощностью 1,5 кВт. Лучепровод от лазера до оптической головки находится вне плеча робота (на шарнирах и зеркалах).

Роботизированная линия «Комау» для лазерной сварки шестерен использовалась на фирме «ФИАТ». В состав линии входит лазер «Спектра-Физикс-973» ($P = 2,5$ кВт). Конвейер для подачи шестерен, технологический стол для перемещения и вращения изделий, роботы-манипуляторы загрузки и выгрузки, а также пресс для запрессовки шестерен на трубчатую заготовку.

Установка для маркировки на базе лазера «Квант-60» обеспечивает сканирование луча с помощью оптомеханических дефлекторов «УМЛА-600-013» со скоростью 20 знаков/с. Размер обрабатываемого поля 50×50 мм и 110×110 мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. Байбородин Ю.В. Введение в лазерную технику. – Киев, «Техшка», 1977. – 240 с.
2. Белостоцкий Б.Р., Любавский И. В., Овчинников В. М. Основы лазерной техники. – М.: «Сов. радио», 1972. – 408 с.: с ил.
3. Бирнбаум Дж. Оптические квантовые генераторы. – М.: Сов. радио, 1967. – 360 с.: с ил.
4. Вивер Л.А. Применение лазеров для размерной обработки и сварки. // Применение лазеров. – М., 1974. – С. 270–317.
5. Белостоцкий Б.Р. Основы лазерной техники. – М.: Сов. радио, 1972. – 405 с.
6. Справочник по лазерной технике / под ред. А.П. Напортовича. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 543 с.
7. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1989. – 300 с.
8. Технологические лазеры: справочник / под ред. Г.А. Абиьсиитова. – М.: Машиностроение, 1991. – Т. 1, 2.

Дополнительная

9. Пахомов И.И., Цибуля А.Б. Расчет оптических систем лазерных приборов. – М.: Радио и связь, 1986. – 151 с.
10. Тарасов А.В. Лазеры. Надежды и действительность. – М.: Наука, 1985. – 175 с.
11. Федоров Б.Ф. Лазеры. Основы устройства и применения. – М.: Наука, 1987. – 195 с.
12. Шиа Д.О., Коллен Р., Родс У. Лазерная техника. – М.: Атомиздат, 1980. – 255 с.

Учебное издание

ЛОСЕВ Валерий Федорович
ЦИПИЛЕВ Владимир Папилович

ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ

Учебное пособие

Редактор

Д.В. Заремба

Верстка

В.П. Аршинова

Дизайн обложки

О.Ю. Аршинова

О.А. Дмитриев

Подписано к печати 05.12.2008. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».


Печать XEROX. Усл. печ. л. 8.61. Уч.-изд. л. 7.78.

Заказ 883. Тираж 200 экз.



Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2000



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.