

ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГРАФЕНА

Материал из Википедии — свободной энциклопедии

Потенциальные области применения графена включают легкие, тонкие и гибкие электрические / фотонные схемы, солнечные элементы и различные медицинские, химические и промышленные процессы, улучшенные или включенные с использованием новых графеновых материалов.[1]

В 2008 году графен, полученный методом эксфолиации, был одним из самых дорогих материалов на Земле, причем образец площадью поперечного сечения человеческого волоса стоил более 1000 долларов по состоянию на апрель 2008 года (около 100 000000 долларов/см²).[2] С тех пор процедуры отшелушивания были расширены, и теперь компании продают графен в больших количествах.[3] в цене эпитаксиального графена на карбиде кремния доминирует цена подложки, которая по состоянию на 2009 год составляла примерно 100 долл./см². Хонг и его команда в Южной Корее впервые синтезировали крупномасштабные графеновые пленки с использованием химического осаждения паров (CVD) на тонких пленках. сообщалось о слоях никеля, которые вызвали исследования по практическому применению[4] с размерами пластин до 760 миллиметров (30 дюймов).[5] к 2017 году графеновая электроника производилась в коммерческом заводе на 200-миллиметровой линии.[6]

В 2013 году Европейский Союз выделил грант в размере 1 миллиарда евро для исследования потенциальных применений графена.[7] в 2013 году был сформирован флагманский консорциум Graphene, включающий технологический университет Чалмерса и семь других европейских университетов и исследовательских центров, а также Nokia.[8]

Содержание

- 1 лекарство
 - 1.1 тканевая инженерия
 - 1.2 контрастные вещества, биоимиджинг
 - 1.3 полимеразная цепная реакция
 - 1.4 устройства
 - 1.5 доставка лекарств
 - 1.6 Биомикророботика
 - 1.7 тестирование
 - 1.8 токсичность
- 2 Электроника
 - 2.1 транзисторы
 - 2.2 прозрачные проводящие электроды
 - 2.3 умножитель частоты
 - 2.4 Оптоэлектроника
 - 2.5 датчики эффекта Холла
 - 2.6 квантовые точки
 - 2.7 органическая электроника
 - 2.8 спинтроника
 - 2.9 проводящие чернила
- 3 Обработка света
 - 3.1 оптический модулятор
 - 3.2 ультрафиолетовая линза
 - 3.3 обнаружение инфракрасного света
 - 3.4 фотоприемник
- 4 энергия
 - 4.1 генерация

- 4.2 хранение данных
- 5 датчиков
- 5.1 биосенсоры
- 5.2 датчики давления
- 5.3 NEMS
- 5.4 молекулярная абсорбция
- 5.5 пьезоэлектрический эффект
- 5.6 движение тела
- 5.7 магнитное поле
- 6 окружающая среда
- 6.1 удаление загрязняющих веществ
- 6.2 фильтрация воды
- 6.3 барьер проникновения
- 7 другое
- 7.1 Плазмоника и метаматериалы
- 7.2 смазка
- 7.3 поглощение радиоволн
- 7.4 окислительно-восстановительные процессы
- 7.5 наноантенны
- 7.6 звуковые преобразователи
- 7.7 водонепроницаемое покрытие
- 7.8 присадка к охлаждающей жидкости
- 7.9 справочный материал
- 7.10 тепловое управление
- 7.11 конструкционный материал
- 7.12 катализатор
- 7.13 авиация
- 8 см. также
- 9 список литературы

Медицина

Исследователи в 2011 году обнаружили способность графена ускорять остеогенную дифференцировку мезенхимальных стволовых клеток человека без использования биохимических индукторов.[9]

В 2015 году исследователи использовали графен для создания биосенсоров с эпитаксиальным графеном на карбиде кремния. Датчики связываются с 8-гидроксидезоксигуанозином (8-OHdG) и способны к селективному связыванию с антителами. Наличие 8-Охдг в крови, моче и слюне обычно ассоциируется с повреждением ДНК. Повышенные уровни 8-Охдг были связаны с повышенным риском развития нескольких видов рака.[10] к следующему году коммерческая версия графенового биосенсора использовалась биологическими исследователями в качестве сенсорной платформы для связывания белков.[11]

В 2016 году исследователи обнаружили, что непокрытый графен можно использовать в качестве нейроинтерфейсного электрода без изменения или повреждения таких свойств, как сила сигнала или образование рубцовой ткани. Графеновые электроды в организме значительно более стабильны, чем электроды из вольфрама или кремния, благодаря таким свойствам, как гибкость, биосовместимость и проводимость.[12]

Тканевая инженерия

Графен был исследован для тканевой инженерии. Он был использован в качестве армирующего агента для улучшения механических свойств биоразлагаемых полимерных нанокомпозитов для инженерных применений костной ткани.[13] дисперсия низкого мас. % графена ($\approx 0,02$ мас.%) повышение механических свойств полимерных нанокомпозитов при сжатии и изгибе.[14] Добавление наночастиц графена в полимерную матрицу приводит к улучшению плотности сшивания нанокомпозита и лучшему переносу нагрузки от полимерной матрицы к лежащему в ее основе наноматериалу, тем самым повышая механические свойства.

Контрастные вещества, биоимиджинг

Функционализированные и поверхностно-активные дисперсные графеновые растворы были разработаны в качестве контрастных агентов МРТ пула крови.[15] Кроме того, йод и марганец, включающие наночастицы графена, служили в качестве мультимодальных контрастных агентов МРТ -компьютерного томографа (КТ).[16] графеновые микро - и наночастицы служили контрастными веществами для фотоакустической и термоакустической томографии.[17] Также сообщалось, что графен эффективно поглощает раковые клетки, что позволяет разрабатывать средства доставки лекарств для лечения рака.[18] Графеновые наночастицы различной морфологии, такие как графеновые нановолокна, графеновые нанопластинки и графеновые наноионы[требуется уточнение], не токсичны при низких концентрациях и не изменяют дифференцировку стволовых клеток, что позволяет предположить, что они могут быть безопасны для использования в биомедицинских целях.[19]

Полимеразная цепная реакция

Сообщается, что графен усиливает ПЦР, увеличивая выход продукта ДНК.[20] эксперименты показали, что теплопроводность графена может быть главным фактором, стоящим за этим результатом. Графен дает ДНК-продукт, эквивалентный положительному контролю, с сокращением циклов ПЦР до 65%.[цитата необходима]

Устройства

Модифицируемая химия графена, большая площадь поверхности на единицу объема, атомная толщина и молекулярно-стролируемая структура делают функционализированные антителами графеновые листы отличными кандидатами для устройств обнаружения и диагностики млекопитающих и микробов.[21] графен настолько тонкий, что вода имеет почти идеальную прозрачность смачивания, что является важным свойством, особенно при разработке приложений для биосенсоров. Это означает, что датчик, покрытый графеном, имеет такой же контакт с водной системой, как и датчик без покрытия, оставаясь при этом механически защищенным от окружающей среды.

Энергия электронов с волновым числом k в графене, рассчитанная в приближении плотной связи. Незанятые (окупированные) состояния, окрашенные в сине-красный (желто-зеленый) цвет, соприкасаются друг с другом без энергетической щели ровно на вышеупомянутых шести k -векторах.

Интеграция слоев графена (толщиной 0,34 нм) в виде наноэлектродов в нанопор [23] потенциально может решить узкое место для секвенирования одномолекулярной ДНК на основе нанопор.

20 ноября 2013 года Фонд Билла и Мелинды Гейтс выделил 100 000 долларов на разработку новых эластичных композитных материалов для презервативов, содержащих наноматериалы, такие как графен.[24]

В 2014 году были анонсированы прозрачные (от инфракрасных до ультрафиолетовых частот) гибкие имплантируемые медицинские сенсорные микрочипы на основе графена, которые позволяют просматривать мозговую ткань, скрытую имплантатами. Оптическая прозрачность была больше 90%. Продемонстрированные приложения включают оптогенетическую активацию фокальных кортикальных областей, визуализацию *in vivo* кортикальной сосудистой сети с помощью флуоресцентной микроскопии и 3D оптической когерентной томографии.[25][26]

Доставка лекарств

Исследователи из Университета Монаша обнаружили, что лист оксида графена может быть преобразован в жидкокристаллические капли спонтанно—как полимер—просто поместив материал в раствор и манипулируя pH. капли графена изменяют свою структуру в присутствии внешнего магнитного поля. Это открытие повышает возможность переноса лекарственного средства в каплях графена и высвобождения лекарственного средства при достижении целевой ткани, заставляя капли менять форму в магнитном поле. Другое возможное применение заключается в обнаружении заболеваний, если обнаруживается, что графен меняет форму в присутствии определенных маркеров заболеваний, таких как токсины.[27][28]

Было продемонстрировано, что графеновый "ковер-самолет" доставляет два противораковых препарата последовательно к опухолевым клеткам легких(клеткаA549) в мышинной модели. Доксорубицин (DOX) встроен в графеновый лист, в то время как молекулы связанного с фактором некроза опухоли апоптоз-индуцирующего лиганда (TRAIL) связаны с наноструктурой через короткие пептидные цепи. Вводимые внутривенно графеновые полоски с полезной нагрузкой препарата преимущественно концентрируются в раковых клетках из-за общей утечки кровеносных сосудов вокруг опухоли. Рецепторы на мембране раковой клетки связывают трейл и ферменты клеточной поверхности закрепите пептид таким образом, чтобы высвободить препарат на поверхность клетки. Без громоздкого следа графеновые полоски со встроенным ДОКСОМ проглатываются в ячейки. Внутриклеточная кислотная среда способствует высвобождению Докса из графена. След на поверхности клетки вызывает апоптоз, в то время как докс атакует ядро. Эти два препарата действуют синергически и оказались более эффективными, чем любой из них в отдельности.[29][30]

Развитие нанотехнологий и молекулярной биологии обеспечило совершенствование наноматериалов со специфическими свойствами, которые в настоящее время способны преодолеть недостатки традиционных методов диагностики и лечения заболеваний.[31] В последние годы все больше внимания уделяется разработке и разработке новых методов обеспечения устойчивого высвобождения различных лекарственных средств. Поскольку каждый препарат имеет уровень в плазме крови, выше которого он токсичен, а ниже-неэффективен и при обычной доставке лекарств концентрация препарата в крови быстро повышается, а затем снижается, основная цель идеальной системы доставки лекарств (DDS) состоит в том, чтобы поддерживать препарат в желаемом терапевтическом диапазоне после однократной дозы и/или нацеливать препарат на определенную область, одновременно снижая системные уровни препарата.[32][33] Материалы на основе графена, такие как оксид графена (GO), имеют значительный потенциал для нескольких биологических применений, включая разработку новой

системы высвобождения лекарств. GOs-это множество функциональных групп, таких как гидроксильные, эпоксидные и карбоксильные на его базальной поверхности и краях, которые также могут быть использованы для иммобилизации или загрузки различных биомолекул для биомедицинских применений. С другой стороны, биополимеры часто используются в качестве сырья для разработки рецептур доставки лекарственных средств благодаря их превосходным свойствам, таким как нетоксичность, биосовместимость, биоразлагаемость и чувствительность к окружающей среде и т.д. Белковая терапия обладает преимуществами по сравнению с низкомолекулярными подходами, включая высокую целевую специфичность и низкие внеклеточные эффекты при нормальных биологических процессах. Человеческий сывороточный альбумин (HSA) является одним из самых распространенных белков крови. Он служит транспортным белком для нескольких эндогенных и экзогенных лигандов, а также различных молекул лекарств. Наночастицы HSA уже давно находятся в центре внимания фармацевтической промышленности благодаря своей способности связываться с различными молекулами лекарственных средств, высокой стабильности хранения и применения *in vivo*, нетоксичности и антигенности, биodeградируемости, воспроизводимости, масштабированию производственного процесса и лучшему контролю свойств высвобождения. Кроме того, значительное количество лекарственных средств может быть включено в матрицу частиц из-за большого количества сайтов связывания лекарственных средств на молекуле альбумина.[34] Таким образом, комбинация HSA-NPs и GO-NSs может быть полезна для снижения цитотоксичности GO-NSs и усиления лекарственной нагрузки и устойчивого высвобождения лекарств в терапии рака.

Биомикророботики

Исследователи продемонстрировали наноразмерный биомикроробот (или цитобот), созданный путем оболочки живой клетки эндоспоры графеновыми квантовыми точками. Прибор действовал как датчик влажности.[35]

Тестирование

В 2014 году был анонсирован продукт для тестирования глюкозы в крови на основе графена.[36][37]

Токсичность

Токсичность графена широко обсуждается в литературе. Наиболее полный обзор токсичности графена опубликован Lalwani et al. обобщает современные знания о токсичности графена *in vitro*, *in vivo*, противомикробных и экологических свойствах, а также освещает различные механизмы токсичности графена.[38] Результаты показывают, что токсичность графена зависит от нескольких факторов, таких как форма, размер, чистота, стадии постпроизводственной обработки, окислительное состояние, функциональные группы, дисперсионное состояние, методы синтеза, путь и доза введения, а также время воздействия.

Электроника

Графен обладает высокой подвижностью несущей и низким уровнем шума, что позволяет использовать его в качестве канала в полевом транзисторе. Немодифицированный графен не имеет энергетической запрещенной зоны, что делает его непригодным для цифровой электроники. Однако модификации (например, графеновые нановолокна) создали потенциальные возможности для использования в различных областях электроники.

Транзисторы

Были построены графеновые транзисторы, которые контролируются химически, и другие, которые контролируются напряжением.

Графен проявляет ярко выраженную реакцию на перпендикулярные внешние электрические поля, потенциально образуя полевые транзисторы (FET). В статье 2004 года были задокументированы FETs с коэффициентом включения-выключения ≈ 30 при комнатной температуре. В статье 2006 года было объявлено о полностью графеновом плоском фэт с боковыми затворами.[40] Их приборы показали изменения на 2% при криогенных температурах. Первый топостробированный FET (коэффициент включения-выключения[41] графеновые нановолокна могут оказаться в целом способными заменить кремний в качестве полупроводника.[42]

Патент США 7015142 на электронику на основе графена был выдан в 2006 году. В 2008 году исследователи из MIT Lincoln Lab произвели сотни транзисторов на одном чипе[43], а в 2009 году очень высокочастотные транзисторы были произведены в исследовательских лабораториях Хьюза.[44]

В статье 2008 года был продемонстрирован эффект переключения, основанный на обратимой химической модификации графенового слоя, который дает коэффициент включения-выключения более шести порядков величины. Эти реверсивные переключатели потенциально могут быть использованы в энергонезависимых запоминающих устройствах.[45] В 2008 году самый маленький транзистор на сегодняшний день, толщиной в один атом и шириной в 10 атомов, был изготовлен из графена.[46] IBM объявила в декабре 2008 года, что они изготовили и охарактеризовали графеновые транзисторы, работающие на частотах ГГц.[47]

В 2009 году исследователи продемонстрировали четыре различных типа логических элементов, каждый из которых состоит из одного графенового транзистора.[48] В мае 2009 года было объявлено о создании транзистора n-типа, что означало создание графеновых транзисторов как n-типа, так и p-типа.[49][50] была продемонстрирована функциональная графеновая интегральная схема—комплементарный инвертор, состоящий из одного графенового транзистора p - и одного n-типа.[51] Однако этот инвертор страдал от очень низкого коэффициента усиления напряжения. Как правило, амплитуда выходного сигнала примерно в 40 раз меньше, чем амплитуда входного сигнала. Более того, ни одна из этих схем не работала на частотах выше 25 кГц.

В том же году численное моделирование с плотной связью[52] показало, что ширина запрещенной зоны, индуцированная в графеновых двухслойных полевых транзисторах, недостаточно велика для высокопроизводительных транзисторов для цифровых приложений, но может быть достаточной для приложений со сверхнизким напряжением при использовании туннельной архитектуры FET.[53]

В феврале 2010 года исследователи анонсировали графеновые транзисторы со скоростью включения-выключения 100 гигагерц, значительно превышающей скорость предыдущих попыток, и превышающей скорость кремниевых транзисторов с равной длиной затвора. Устройства длиной 240 нм были изготовлены на обычном оборудовании для производства кремния.[54][55][56] Согласно отчету за январь 2010 года,[57] графен эпитаксиально выращивали на SiC в количестве и качестве, пригодных для массового производства интегральных схем. При высоких температурах

квантовый эффект Холла может быть измерен в этих образцах. IBM построила "процессоры" с использованием транзисторов 100 ГГц на 2-дюймовых (51 мм) графеновых листах.[58]

В июне 2011 года исследователи IBM объявили, что им удалось создать первую интегральную схему на основе графена-широкополосный радиомикшер.[59] схема обрабатывала частоты до 10 ГГц. На его производительность не влияли температуры до 127 °С. В ноябре исследователи использовали 3d-печать (аддитивное производство) в качестве метода изготовления графеновых устройств.[60]

В 2013 году исследователи продемонстрировали высокую подвижность графена в детекторе, который позволяет осуществлять широкополосную частотную селективность в диапазоне от ТГц до ИК-области (0,76-33 ТГц)[61] отдельная группа создала терагерцовый транзистор с бистабильными характеристиками, что означает, что устройство может самопроизвольно переключаться между двумя электронными состояниями. Устройство состоит из двух слоев графена, разделенных изолирующим слоем нитрида бора толщиной в несколько атомных слоев. Электроны проходят через этот барьер с помощью квантового туннелирования. Эти новые транзисторы обладают отрицательной дифференциальной проводимостью, в результате чего один и тот же электрический ток протекает при двух различных приложенных напряжениях.[62] в июне была описана схема кольцевого генератора на 8 транзисторах с частотой 1,28 ГГц.[63]

Отрицательное дифференциальное сопротивление, экспериментально наблюдаемое в графеновых полевых транзисторах традиционной конструкции, позволяет строить жизнеспособные Небольшие вычислительные архитектуры с графеном. Отрицательное дифференциальное сопротивление, наблюдаемое при определенных схемах смещения, является внутренним свойством графена, обусловленным его симметричной полосовой структурой. Полученные результаты представляют собой концептуальное изменение в исследованиях графена и указывают на альтернативный путь применения графена в обработке информации.[64]

В 2013 году исследователи создали транзисторы, напечатанные на гибком пластике, которые работают на частоте 25 гигагерц, достаточной для коммуникационных цепей, и которые могут быть изготовлены в масштабе. Сначала исследователи изготовили на пластиковых листах структуры, не содержащие графен-электроды и затворы. Отдельно они выращивали большие листы графена на металле, затем очищали его и переносили на пластик. Наконец, они покрыли простыню водонепроницаемым слоем. Устройства работают после замачивания в воде и достаточно гибки, чтобы их можно было сложить.[65]

В 2015 году исследователи разработали цифровой переключатель, перфорируя графеновый лист нанотрубками из нитрида бора, которые демонстрировали коэффициент переключения 105 при напряжении включения 0,5 В. Теория функционала плотности предположила, что поведение происходит из-за несоответствия плотности состояний.[66]

Трехслойный

Электрическое поле может изменить кристаллическую структуру трехслойного графена, трансформируя его поведение из металлического в полупроводниковое. Острый металлический сканирующий туннельный микроскопический наконечник был способен перемещать доменную границу между верхней и нижней конфигурациями графена. Одна сторона материала ведет себя

как металл, в то время как другая сторона ведет себя как полупроводник. Трехслойный графен может быть уложен как в Берналь, так и в ромбоэдр конфигурации, которые могут существовать в одной чешуйке. Эти две области разделены точной границей, на которой средний слой напряжен, чтобы приспособить переход от одной схемы укладки к другой.[67]

Кремниевые транзисторы функционируют как полупроводники p-типа или n-типа, тогда как графен может работать как в обоих случаях. Это снижает затраты и является более универсальным. В основе метода лежит полевой транзистор. Масштабируемые технологии производства еще не разработаны.[67]

В трехслойном графене две конфигурации укладки проявляют очень разные электронные свойства. Область между ними состоит из локализованного деформационного солитона, в котором атомы углерода одного графенового слоя смещаются на расстояние углерод–углеродная связь. Разница в свободной энергии между двумя конфигурациями штабелирования квадратично масштабируется с электрическим полем, что благоприятствует ромбоэдрическому штабелированию по мере увеличения электрического поля.[67]

Эта способность контролировать порядок укладки открывает путь к новым устройствам, сочетающим в себе структурные и электрические свойства.[67][68]

Транзисторы на основе графена могут быть намного тоньше, чем современные кремниевые устройства, что позволяет создавать более быстрые и небольшие конфигурации.[69]

Прозрачные проводящие электроды

Высокая электропроводность графена и высокая оптическая прозрачность делают его кандидатом на прозрачные проводящие электроды, необходимые для таких применений, как сенсорные экраны, жидкокристаллические дисплеи, неорганические фотоэлектрические элементы, органические фотоэлементы и органические светодиоды. В частности, механическая прочность и гибкость графена выгодны по сравнению с оксидом индия-олова, который является хрупким. Графеновые пленки могут осаждаться из раствора на больших площадях.[72][73][74]

Крупногабаритные, непрерывные, прозрачные и высокопроводящие малослойные графеновые пленки были получены методом химического осаждения из паровой фазы и использованы в качестве анодов для применения в фотоэлектрических устройствах. Продемонстрирована эффективность преобразования мощности (КПЭ) до 1,7%, что составляет 55,2% КПЭ управляющего устройства на основе оксида индия-олова. Однако главным недостатком способа изготовления будет плохое сцепление подложек, что в конечном итоге приведет к плохой циклической стабильности и вызовет высокое удельное сопротивление электродов.[75]

Были продемонстрированы органические светоизлучающие диоды (OLED) с графеновыми анодами. Устройство было сформировано обработанным раствором графеном на кварцевой подложке. Электронные и оптические характеристики устройств на основе графена аналогичны устройствам, изготовленным из оксида индия-олова.[76] В 2017 году OLED-электроды были изготовлены компанией CVD на медной подложке.[77]

Было продемонстрировано устройство на основе углерода, называемое светоизлучающей электрохимической ячейкой (LEC), с химически полученным графеном в качестве катода и проводящим полимером Поли (3,4-этилендиокситиофен) (PEDOT) в качестве анода. В отличие от

своих предшественников, это устройство содержит только электроды на основе углерода, без металла.[цитата необходима]

В 2014 году был продемонстрирован прототип гибкого дисплея на основе графена.[79]

В 2016 году исследователи продемонстрировали дисплей, который использовал интерферометрическую модуляцию для управления цветами, названный "графеновым баллоном", изготовленным из кремния, содержащего 10 мкм круглых полостей, покрытых двумя графеновыми листами. Степень искривления листов над каждой полостью определяет излучаемый цвет. Устройство использует явления, известные как кольца Ньютона создается интерференцией между световыми волнами, отражающимися от дна полости и (прозрачного) материала. Увеличение расстояния между кремнием и мембраной увеличивало длину волны света. Этот подход используется в цветных дисплеях электронных ридеров и умных часах, таких как Qualcomm Toq. Они используют кремниевые материалы вместо графена. Графен снижает требования к питанию.[80]

Умножитель частоты

В 2009 году исследователи построили экспериментальные графеновые умножители частоты, которые принимают входящий сигнал определенной частоты и выводят сигнал, кратный этой частоте.[81]

Оптоэлектроника

Графен сильно взаимодействует с фотонами, обладая потенциалом для прямого создания запрещенной зоны. Это перспективно для оптоэлектронных и нанофотонных устройств. Взаимодействие света возникает из-за сингулярности Ван Хофа. Графен отображает различные временные шкалы в ответ на взаимодействие фотонов, начиная от фемтосекунд (сверхбыстрых) до пикосекунд. Потенциальные применения включают прозрачные пленки, сенсорные экраны и световые излучатели или в качестве плазмонного устройства, которое ограничивает свет и изменяет длины волн.[82]

Датчики эффекта Холла

Благодаря чрезвычайно высокой подвижности электронов графен может быть использован для изготовления высокочувствительных датчиков эффекта Холла.[83] потенциальное применение таких датчиков связано с трансформаторами постоянного тока для специальных применений.в апреле 2015 года появились сообщения о новых рекордно высокочувствительных датчиках Холла. Эти датчики в два раза лучше, чем существующие датчики на основе Si.[84]

Квантовые точки

Квантовые точки графена (GQDs) сохраняют все размеры менее 10 нм. Их размер и Кристаллография определяют электрические, магнитные, оптические и химические свойства. GQDs может быть получен с помощью графитовой нанотомии[85] или с помощью восходящих, основанных на растворе путей (реакции Дильса-Альдера, циклотримеризации и/или циклодегидрирования).[86] GQDs с контролируемой структурой можно включать в применения в электронике, оптоэлектронике и электромагнетизме. Квантовое удержание может быть создано

путем изменения ширины графеновых нановолокон (GNR) в выбранных точках вдоль ленты.[46][87] Он изучается как катализатор для топливных элементов.[88]

Органическая электроника

Полупроводниковый полимер (поли (3-гексилтиофен))[89], помещенный поверх однослойного графена вертикально, проводит электрический заряд лучше, чем на тонком слое кремния. Полимерная пленка толщиной 50 нм проводила заряд примерно в 50 раз лучше, чем пленка толщиной 10 нм, потенциально потому, что первая состоит из мозаики изменчиво ориентированных кристаллитов, образующих непрерывный путь взаимосвязанных кристаллов. В тонкой пленке или на кремнии пластинчатые кристаллиты ориентированы параллельно графеновому слою. Использование включает в себя солнечные батареи.[90]

Спинтроника

Графен большой площади, созданный химическим осаждением из паровой фазы (CVD) и слоистый на подложке SiO₂, может сохранять спин электрона в течение длительного периода и передавать его. Спинтроника изменяет спин электрона, а не поток тока. Спиновый сигнал сохраняется в графеновых каналах длиной до 16 микрометров в течение наносекунды. Чистый спиновый транспорт и прецессия распространялись на длину канала 16 мкм со временем жизни спина 1,2 нс и длиной диффузии спина ≈ 6 мкм при комнатной температуре.[91]

Спинтроника используется в дисковых для хранения данных и в магнитной оперативной памяти. Электронный спин, как правило, недолговечен и хрупок, но информация на основе спина в современных устройствах должна перемещаться всего на несколько нанометров. Однако в процессорах информация должна пересекать несколько десятков микрометров с выровненными спинами. Графен-единственный известный кандидат на такое поведение.[91]

Проводящие чернила

В 2012 году Vorbeck Materials начала поставлять противоугольное упаковочное устройство Siren, которое использует свои графеновые схемы Vor-Ink для замены металлической антенны и внешней проводки к RFID-чипу. Это был первый в мире коммерчески доступный продукт на основе графена.[92][93]

Обработка света

Оптический модулятор

Когда уровень Ферми графена настроен, его оптическое поглощение может быть изменено. В 2011 году исследователи сообщили о Первом оптическом модуляторе на основе графена. Работая на частоте 1,2 ГГц без регулятора температуры, этот модулятор имеет широкую полосу пропускания (от 1,3 до 1,6 мкм) и небольшую площадь (~ 25 мкм²).[94]

Недавно был продемонстрирован модулятор Маха-Зендера на основе гибридного графен-кремниевого волновода, который может обрабатывать сигналы почти без чирканья.[95] получены экстинкция до 34,7 дБ и минимальный параметр чирпа -0,006. Его вносимые потери составляют примерно -1,37 дБ.

Ультрафиолетовая линза

Гиперлинза-это сверхразрешающая линза реального времени, которая может преобразовывать мимолетные волны в распространяющиеся волны и тем самым нарушать дифракционный предел. В 2016 году гиперлинзы на основе диэлектрического слоистого графена и нитрида Н-Бора (Н-БН) могут превзойти металлические конструкции. Основываясь на его анизотропных свойствах, плоские и цилиндрические гиперлинзы были численно проверены с помощью слоистого графена при 1200 ТГц и слоистого h-BN при 1400 ТГц соответственно.[96] В 2016 году появились графеновые микролинзы толщиной 1 нм, которые могут изображать объекты размером с одну бактерию. Линза была создана путем распыления листа раствора оксида графена, а затем формования линзы с помощью лазерного луча. Он может разрешать объекты размером до 200 нанометров и видеть в ближнем инфракрасном диапазоне. Он нарушает дифракционный предел и достигает фокусного расстояния менее половины длины волны света. Возможные области применения включают тепловизионные изображения для мобильных телефонов, эндоскопов, наноспутников и фотонных чипов в суперкомпьютерах и сверхбыстрой широкополосной связи.[97]

Обнаружение инфракрасного света

Графен реагирует на инфракрасный спектр при комнатной температуре, хотя и с чувствительностью от 100 до 1000 раз слишком низкой для практического применения. Однако два графеновых слоя, разделенные изолятором, позволяли электрическому полю, создаваемому дырками, оставленными фото-освобожденными электронами в одном слое, влиять на ток, проходящий через другой слой. Этот процесс производит мало тепла, что делает его пригодным для использования в оптике ночного видения. Сэндвич достаточно тонкий, чтобы быть интегрированным в портативные устройства, компьютеры с очками и даже контактные линзы.[98]

Фотоприемник

Было продемонстрировано, что гетеропереход графен/n-типа кремния проявляет сильное выпрямляющее поведение и высокую фотореактивность. Благодаря введению тонкого межфазного оксидного слоя темный ток гетероперехода графен/n-Si был уменьшен на два порядка при нулевом смещении. При комнатной температуре фотоприемник графен/n-Si с межфазным оксидом проявляет специфическую детективность до $5,77 \times 10^{13}$ см Гц^{1/2} Вт² при пиковой длине волны 890 Нм в вакууме. Кроме того, улучшенные гетеропереходные фотоприемники graphene/n-Si обладают высокой чувствительностью 0,73 а Вт⁻¹ и высокое отношение фото-к-темному току $\approx 10^7$. Эти результаты показывают, что гетеропереход графен/Si с межфазным оксидом перспективен для разработки фотоприемников с высокой детективностью.[99] недавно появился фотоприемник графена/Си Шоттки с рекордно быстрой скоростью отклика ([100] Фотоприемники демонстрируют превосходную долговременную стабильность даже при хранении на воздухе более 2 лет. Эти результаты не только продвигают разработку высокопроизводительных фотоприемников на основе соединения графен/Си Шоттки, но и имеют важные последствия для массового производства графеновых фотоприемных решеток для экономически эффективного мониторинга окружающей среды, медицинских изображений, связи в свободном космосе, фотоэлектрического интеллектуального слежения и интеграции с КМОП-схемами для новых интересных приложений и т. д.

Энергия

Поколение

Дистилляция этанола

Мембраны из оксида графена пропускают водяной пар, но непроницаемы для других жидкостей и газов. Это явление было использовано для дальнейшей дистилляции водки до более высоких концентраций спирта, в лаборатории комнатной температуры, без применения тепла или вакуума, как это используется в традиционных методах дистилляции.

Солнечные батареи

Проводник заряда

Графеновые солнечные элементы используют уникальное сочетание высокой электропроводности и оптической прозрачности графена. Этот материал поглощает только 2,6% зеленого света и 2,3% красного. Графен может быть собран в пленочный электрод с низкой шероховатостью. Эти пленки должны быть сделаны толще, чем один атомный слой, чтобы получить полезные сопротивления листа. Это добавленное сопротивление может быть компенсировано путем включения проводящих наполнителей, таких как кварцевая матрица. Снижение электропроводности может быть компенсировано присоединением больших ароматических молекул, таких как пирен- Натриевая соль 1-сульфоислоты (PyS) и динатриевая соль 3,4,9,10-перилентетракарбонового диимида бисбензолсульфоновой кислоты (PDI). Эти молекулы при высоких температурах способствуют лучшему π -сопряжению базальной плоскости графена.[104]

Коллектор света

Использование графена в качестве фотоактивного материала требует, чтобы его полоса пропускания составляла 1,4–1,9 эВ. В 2010 году была достигнута одноклеточная эффективность наноструктурированных ПВС на основе графена более чем на 12%. По мнению П. Мухопадхя и Р. К. Гупты, органические фотоэлектрики могут быть "устройствами, в которых полупроводниковый графен используется в качестве фотоактивного материала, а металлический графен-в качестве проводящих электродов".[104]

В 2008 году методом химического осаждения из паровой фазы были получены графеновые листы путем осаждения графеновой пленки из метана на никелевую пластину. Поверх графенового слоя укладывается защитный слой термопластика, а никель под ним затем растворяется в кислой ванне. Последний шаг-прикрепить графен с пластиковым покрытием к гибкому полимерному листу, который затем может быть встроен в фотоэлемент. Графеновые / полимерные листы имеют размер до 150 квадратных сантиметров и могут быть использованы для создания плотных массивов.[105]

Кремний генерирует только один электрон, управляющий током, для каждого фотона, который он поглощает, в то время как графен может производить несколько электронов. Солнечные элементы сделанные с графеном смогли предложить эффективность преобразования 60%.[106]

Электрод

В 2010 году исследователи впервые сообщили о создании графен-кремниевых гетеропереходных солнечных элементов, где графен служил прозрачным электродом и вводил встроенное электрическое поле вблизи границы раздела между графеном и кремнием n-типа, чтобы помочь собрать носители заряда.[107] в 2012 году исследователи сообщили об

эффективности 8,6% для прототипа, состоящего из кремниевой пластины, покрытой трифторметансульфониламидом (TFSA), легированным графеном. Допинг повысил эффективность до 9,6% в 2013 году.[108] в 2015 году исследователи сообщили об эффективности 15,6%, выбрав оптимальную толщину оксида на кремнии.[109] Такое сочетание углеродных материалов с традиционными кремниевыми полупроводниками для изготовления солнечных элементов является перспективной областью углеродной науки.[110]

В 2013 году другая команда сообщила о 15,6% - ном проценте, объединив оксид титана и графен в качестве коллектора заряда и перовскит в качестве поглотителя солнечного света. Устройство может быть изготовлено при температуре ниже 150 °C (302 °F) с использованием осаждения на основе раствора. Это снижает производственные затраты и открывает возможности для использования гибких пластмасс.[111]

В 2015 году исследователи разработали прототип ячейки, в которой использовался полупрозрачный перовскит с графеновыми электродами. Конструкция позволяла поглощать свет с обеих сторон. Он предлагал эффективность около 12 процентов при предполагаемых производственных затратах менее 0,06 доллара за ватт. Графен был покрыт PEDOT: PSS проводящим полимером (политиофен) полистиролсульфонат). Многослойный графен с помощью CVD создавал прозрачные электроды, снижающие сопротивление листа. Производительность была дополнительно улучшена за счет увеличения контакта между верхними электродами и транспортным слоем отверстия.[112]

Топливные элементы

Соответственно перфорированный графен (и гексагональный нитрид бора hBN) может позволить протонам проходить через него, предлагая потенциал для использования монослоев графена в качестве барьера, который блокирует атомы водорода, но не протоны/ионизированный водород (атомы водорода с их электронами). Они могли бы даже использоваться для извлечения водорода из атмосферы, который мог бы питать электрические генераторы окружающим воздухом.[113]

Мембраны более эффективны при повышенных температурах и покрыты каталитическими наночастицами, такими как платина.[113]

Графен мог бы решить главную проблему для топливных элементов: пересечение топлива, которое снижает эффективность и долговечность.[113]

В метанольных топливных элементах графен, используемый в качестве барьерного слоя в области мембраны, имеет пониженное пересечение топлива с незначительным протонным сопротивлением, улучшая производительность.[114]

При комнатной температуре протонная проводимость с монослоем hBN превосходит графеновую, с удельным сопротивлением протонному потоку около 10 омсм² и низкой энергией активации около 0,3 электрон-вольта. При более высоких температурах графен превосходит его по удельному сопротивлению, которое, по оценкам, падает ниже 10-3 омсм² выше 250 градусов Цельсия.[115]

В другом проекте протоны легко проходят через слегка несовершенные графеновые мембраны на плавном кремнезем в воде.[116] мембрана подвергалась воздействию циклов высокого и низкого pH. протоны обратимо переносятся из водной фазы через графен на другую сторону, где

они подвергаются кислотно–щелочной химии с гидроксильными группами кремнезема. Компьютерное моделирование показало, что энергетические барьеры составляют 0,61-0,75 эВ для конечных гидроксильных атомных дефектов, которые участвуют в реле типа Гроттуса, в то время как пирильные эфирные окончания этого не делают.[117] Недавно пол и его коллеги из IISER Bhopal продемонстрировали твердотельную протонную проводимость для функционализированного кислородом малослойного графена ($8 \cdot 10^{-3}$ с / см) с низким активационным барьером (0,25 эВ).[118]

Темозлектрики

Добавление 0,6% графена к смеси лантана и частично восстановленного стронция оксида титана дает сильный Зеебек при температурах от комнатной температуры до 750 °C (по сравнению с 500-750 без графена). Материал преобразует 5% тепла в электричество (по сравнению с 1% для оксида титана стронция).[119]

Покрытие конденсатора

В 2015 году графеновое покрытие на конденсаторах водяного пара вчетверо повысило эффективность конденсации, увеличив общий КПД установки на 2-3 процента.[120]

Хранение

Суперконденсатор

Из-за высокого отношения площади поверхности к массе графена одно потенциальное применение находится в проводящих пластинах суперконденсаторов.[121]

В феврале 2013 года исследователи объявили о новом методе производства графеновых суперконденсаторов, основанном на подходе к сокращению сжигания DVD-дисков.[122]

В 2014 году был анонсирован суперконденсатор, который, как утверждалось, достигал плотности энергии, сравнимой с нынешними литий-ионными батареями.[36][37]

В 2015 году эта технология была адаптирована для производства штабелированных трехмерных суперконденсаторов. Лазерно-индуцированный графен был получен с обеих сторон полимерного листа. Затем секции были сложены в штабеля, разделенные твердыми электролитами, образуя несколько микросуперконденсаторов. Штабелированная конфигурация существенно увеличила плотность энергии результата. В ходе тестирования исследователи заряжали и разряжали устройства в течение тысяч циклов почти без потери емкости.[123] Полученные устройства были механически гибкими, выдерживая 8000 циклов изгиба. Это делает их потенциально пригодными для прокатки в цилиндрической конфигурации. Твердотельные полимерные устройства на основе электролитов демонстрируют площадную емкость >9 МФ/см² при плотности тока 0,02 ма / см², что в два раза больше, чем у обычных водных электролитов.[124]

Также в 2015 году другой проект анонсировал микросуперконденсатор, который достаточно мал, чтобы поместиться в носимых или имплантируемых устройствах. Всего одна пятая толщины листа бумаги, он способен удерживать более чем в два раза больше заряда, чем сопоставимая тонкопленочная литиевая батарея. В конструкции использовался лазерный графен, или МСУ с диоксидом марганца. Их можно изготовить без экстремальных температур или дорогих "сухих комнат". Их мощность в шесть раз больше, чем у коммерчески доступных

суперконденсаторов.[125] Устройство достигло объемной емкости более 1100 Ф / см³. Это соответствует удельной емкости составляющей MnO₂ 1,145 ф/г, близкой к теоретическому максимуму 1,380 Ф/г. плотность энергии колеблется от 22 до 42 Втч / л в зависимости от конфигурации устройства. [126]

В мае 2015 года настоящий на борной кислотелазерно-индуцированный графеновый суперконденсатор утроил свою площадную плотность энергии и увеличил объемную плотность энергии в 5-10 раз. Новые устройства оказались стабильными в течение 12000 циклов заряда-разряда, сохраняя 90 процентов своей емкости. В ходе стресс-тестов они выдержали 8000 циклов изгиба.[127][128]

Батареи

В 2012 году были продемонстрированы кремнийграфеновые анодные литий-ионные аккумуляторы.[129]

Стабильный литий-ионный цикл был продемонстрирован в двух - и малослойных графеновых пленках, выращенных на никелевых подложках[130], в то время как однослойные графеновые пленки были продемонстрированы в качестве защитного слоя от коррозии в компонентах батарей, таких как корпус батареи. Это создает возможности для гибких электродов для микромасштабных литий-ионных аккумуляторов, где анод выступает в качестве активного материала и токоъемника.[132]

Исследователи построили литий-ионную батарею из графена и кремния, которая, как утверждалось, прослужила более недели на одном заряде и заняла всего 15 минут.[133]

В 2015 году для бомбардировки образцов графена ионами Аргона была использована плазменная обработка на основе аргона-Иона. Это выбило некоторые атомы углерода и увеличило емкость материалов в три раза. Эти дефекты "кресла" и "зигзага" названы на основе конфигураций атомов углерода, которые окружают дырки.[134][135]

В 2016 году компания Huawei анонсировала графеновые литий-ионные аккумуляторы с большей теплостойкостью и вдвое большим сроком службы, чем традиционные литий-ионные аккумуляторы, компоненты с самым коротким сроком службы в мобильных телефонах.[136][137][138]

Датчики

Биосенсоры

Графен не окисляется на воздухе или в биологических жидкостях, что делает его привлекательным материалом для использования в качестве биосенсора.[139] схема графена может быть сконфигурирована в качестве полевого биосенсора путем нанесения на графен молекул биологического захвата и блокирующих слоев, а затем управления разностью напряжений между графеном и жидкостью, включающей биологический тестовый образец. Из различных типов графеновых датчиков, которые могут быть изготовлены, биосенсоры были первыми, кто был доступен для продажи.[6]

Датчики давления

Электронные свойства гетероструктур графен / h-BN могут быть модулированы путем изменения межслойных расстояний путем приложения внешнего давления, что приводит к потенциальной реализации атомно-тонких датчиков давления. В 2011 году исследователи предложили встроенный датчик давления, состоящий из графена, зажато между гексагональным нитридом бора, и туннельный датчик давления, состоящий из h-BN, зажато графеном.[140] Течение меняет 3 порядка величины по мере того как давление увеличивает от 0 до 5 nN/nm². Эта структура нечувствительна к количеству слоев обертывания h-BN, что упрощает управление технологическим процессом. Поскольку h-BN и графен инертны к высокой температуре, устройство может поддерживать ультратонкие датчики давления для применения в экстремальных условиях.

В 2016 году исследователи продемонстрировали биосовместимый датчик давления, изготовленный из смешивания графеновых хлопьев с сшитым полисиликоном (найденным в глупой замазке).[141]

NEMS

Нанoeлектромеханические системы (НЕМС) могут быть спроектированы и охарактеризованы на основе понимания взаимодействия и связи между механической, электрической и Ван-дер-Ваальсовой энергетическими областями. Квантовомеханический предел, определяемый соотношением неопределенности Гейзенберга, определяет конечную точность наномеханических систем. Квантовое сжатие может повысить точность, уменьшив квантовые флуктуации в одной желаемой амплитуде из двух квадратурных амплитуд. Традиционные немы с трудом достигают квантового сжатия из-за своих пределов толщины. Предложена схема получения сжатых квантовых состояний через типичные экспериментальные графеновые НЕМС-структуры, использующие преимущества толщины его атомного масштаба.[142]

Молекулярная абсорбция

Теоретически графен является отличным датчиком благодаря своей двумерной структуре. Тот факт, что весь его объем подвергается воздействию окружающей среды, делает его очень эффективным для обнаружения адсорбированных молекул. Однако, подобно углеродным нанотрубкам, графен не имеет всяких связей на своей поверхности. Газообразные молекулы не могут быть легко адсорбированы на поверхности графена, поэтому по своей природе графен нечувствителен.[143] Чувствительность графеновых химических газовых сенсоров может быть значительно повышена за счет функционализации, например, покрытия пленки тонким слоем определенных полимеров. Тонкий слой полимера действует как концентратор, который поглощает газообразные молекулы. Поглощение молекул приводит к локальному изменению электрического сопротивления графеновых датчиков. В то время как этот эффект наблюдается в других материалах, графен превосходит их благодаря своей высокой электропроводности (даже при наличии нескольких носителей) и малому уровню шума, что делает это изменение сопротивления обнаружимым.[144]

Пьезоэлектрический эффект

Моделирование теории функционала плотности предсказывает, что осаждение определенных адатомов на графен может сделать его пьезоэлектрически чувствительным к электрическому полю, приложенному во внеплоскостном направлении. Этот тип локально спроектированного

пьезоэлектричества аналогичен по величине объемным пьезоэлектрическим материалам и делает графен кандидатом для управления и зондирования в наноразмерных устройствах.[145]

Движение тела

Повышенный спрос на носимые устройства доказал, что графен является перспективным материалом для потенциального применения в гибких и высокочувствительных тензодатчиках. Предложен экологически чистый и экономически эффективный способ изготовления крупногабаритных ультратонких графеновых пленок для высокочувствительного гибкого тензодатчика. Собранные графеновые пленки быстро выводятся на границе раздела жидкость / воздух с помощью эффекта Марангони, и площадь может быть увеличена. Эти тензодатчики на основе графена демонстрируют чрезвычайно высокую чувствительность с калибровочным коэффициентом 1037 при деформации 2%, что представляет собой самое высокое значение для графеновых тромбоцитов при этой небольшой деформации до сих пор.[146]

Резиновые ленты, пропитанные графеном ("G-полосы"), можно использовать в качестве недорогих датчиков тела. Полосы остаются гибкими и могут использоваться в качестве датчика для измерения дыхания, частоты сердечных сокращений или движения. Легкие сенсорные костюмы для уязвимых пациентов позволяли дистанционно отслеживать малозаметные движения. Эти датчики показывают увеличение сопротивления 10×10^4 раз и работают при напряжениях, превышающих 800%. Наблюдались калибровочные коэффициенты до 35. Такие датчики могут работать на частотах вибрации не менее 160 Гц. При частоте 60 Гц можно контролировать деформацию не менее 6% при скорости деформации более 6000%/с.[147]

Магнитная

В 2015 году исследователи анонсировали магнитный датчик на основе графена, в 100 раз более чувствительный, чем эквивалентное устройство на основе кремния (7000 вольт на ампер-Тесла). Подложкой сенсора служил гексагональный нитрид бора. Датчики были основаны на эффекте Холла, в котором магнитное поле индуцирует силу Лоренца на движущихся носителях электрического заряда, что приводит к отклонению и измеряемому напряжению Холла. В худшем случае графен примерно соответствовал лучшей конструкции кремния. В лучшем случае графен требовал более низких требований к току источника и мощности.[148]

Окружающая

Удаление загрязняющих

Оксид графена нетоксичен и поддается биологическому разложению. Его поверхность покрыта эпоксидными, гидроксильными и карбоксильными группами, которые взаимодействуют с катионами и анионами. Он растворим в воде и образует стабильные коллоидные суспензии в других жидкостях, потому что он амфифилен (способен смешиваться с водой или маслом). Диспергируемый в жидкостях, он обладает отличной сорбционной способностью. Он может удалить медь, кобальт, кадмий, арсенат и органические растворители.

Фильтрация воды

Дополнительная информация: оксид графита § очистка воды

Исследования показывают, что графеновые фильтры могут значительно превосходить другие методы опреснения воды.[149]

Барьер проницаемости

Вместо того чтобы позволить проникновению, необходимо также блокировать его. Газопроницаемые барьеры важны практически для всех применений, начиная от пищевых, фармацевтических, медицинских, неорганических и органических электронных устройств и т.д. упаковка. Это продлевает срок службы изделия и позволяет сохранить общую толщину устройств небольшой. Будучи атомарно тонким, бездефектный графен непроницаем для всех газов. В частности, показано, что ультратонкие влагопроницаемые барьерные слои на основе графена важны для органических ФЭТ и ОлЭД.[150][151] В настоящее время изучается применение графеновых барьеров в биологических науках.

Другое

Плазмоника и метаматериалы

Графен вмещает плазмонных поверхностных режиме,[152] наблюдается в последнее время через ближнего поля инфракрасной оптической микроскопии методов[153][154] и инфракрасной спектроскопии [155] возможности применения в терагерцовой в средней инфракрасной области частот,[156] как терагерцового и среднего инфракрасного света, модуляторов, пассивных фильтрах терагерцового диапазона, среднего инфракрасного диапазона-фотоприемников и биосенсоров.[157]

Смазка

Ученые обнаружили, что использование графена в качестве смазки работает лучше, чем традиционно используемый графит. Слой графена толщиной в один атом между стальным шаром и стальным диском длился 6500 циклов. Обычные смазочные материалы рассчитаны на 1000 циклов.[158]

Поглощение радиоволн

Уложенные графеновые слои на кварцевой подложке увеличивали поглощение миллиметровых (радиоволн) волн на 90% в диапазоне 125-165 ГГц, расширяясь до микроволновых и низких терагерцовых частот, оставаясь при этом прозрачными для видимого света. Например, графен можно использовать в качестве покрытия для зданий или окон, чтобы блокировать радиоволны. Поглощение является результатом взаимно связанных резонаторов Фабри-Перо, представленных каждой графен-кварцевой подложкой. Для контроля удельного сопротивления поверхности использовался повторный процесс переноса и травления.[159][160]

Редокс

Оксид графена может быть обратимо восстановлен и окислен с помощью электрического стимула. Показано, что контролируемое восстановление и окисление в двухполюсниках, содержащих многослойные пленки оксида графена, приводит к переключению между частично восстановленным оксидом графена и графеном, что приводит к изменению электронных и оптических свойств. Окисление и восстановление связаны с резистивным переключением.[161]

Наноантенны

Плазмонная наноантенна на основе графена (GPN) может эффективно работать на миллиметровых радиоволнах. Длина волны поверхностных плазмонных поляритонов для данной частоты в несколько сотен раз меньше длины волны свободно распространяющихся электромагнитных волн той же частоты. Эти различия в скорости и размерах позволяют эффективным антеннам на основе графена быть намного меньше, чем обычные альтернативы. Последние работают на частотах в 100-1000 раз больших, чем Гнс, производя в 0,01–0,001 раза больше фотонов.[162]

Электромагнитная волна (ЭМ), направленная вертикально на поверхность графена, возбуждает графен в колебания, которые взаимодействуют с колебаниями в диэлектрике, на котором установлен графен, тем самым образуя поверхностные плазмонные поляритоны (СПП). Когда антенна становится резонансной (интегральное число длин волн SPP вписывается в физические размеры графена), связь SPP/EM значительно возрастает, эффективно передавая энергию между ними.[162]

Фазированная антенная решетка диаметром 100 мкм могла бы генерировать 300 ГГц пучки диаметром всего в несколько градусов вместо 180-градусного излучения от обычной металлической антенны такого размера. Потенциальные области применения включают интеллектуальную пыль, маломощные терабитные беспроводные сети[162] и фотонику.[163]

Наноразмерная золотая стержневая антенна улавливала и преобразовывала энергию ЭМ в графеновые плазмоны, аналогично радиоантенне, преобразующей радиоволны в электромагнитные волны в металлическом кабеле. Плазмонные волновые фронты могут управляться непосредственно путем регулировки геометрии антенны. Волны фокусировались (изгибая антенну) и преломлялись (призматическим графеновым бислоем), поскольку проводимость в призме толщиной в два атома больше, чем в окружающем ее слое толщиной в один атом.)[163]

Плазмонная металл-графеновая наноантенна была образована путем введения нескольких нанометров оксида между дипольным золотым нанородом и монослоем графена.[164] используемый здесь оксидный слой может уменьшить квантовый эффект перестройки между графеном и металлической антенной. При настройке химического потенциала графенового слоя через полевую транзисторную архитектуру реализуется связь в фазе и вне фазы между графеновой пальмоникой и металлической плазмоникой.[164] Перестраиваемые свойства плазмонной металл-графеновой наноантенны можно включать и выключать, изменяя электростатическое напряжение затвора на графене.

Звуковые преобразователи

Легкий вес графена обеспечивает относительно хорошую частотную характеристику, что позволяет использовать его в электростатических аудиодинамиках и микрофонах.[165] в 2015 году были продемонстрированы ультразвуковой микрофон и динамик, которые могли работать на частотах от 20 Гц до 500 кГц.[166] динамик работал с заявленным КПД 99% с плоской частотной характеристикой во всем слышимом диапазоне. Одно из применений было в качестве замены радио для дальней связи, учитывая способность звука проникать сквозь сталь и воду, в отличие от радиоволн.[166]

Водонепроницаемое покрытие

Графен потенциально может привести к появлению нового поколения водонепроницаемых устройств, корпус которых, возможно, не нуждается в герметизации, как современные устройства.[133][сомнительно -обсудить]

Присадка

Высокая теплопроводность графена позволяет предположить, что он может быть использован в качестве добавки в охлаждающие жидкости. Предварительные исследования показали, что 5% графена по объему могут повысить теплопроводность базовой жидкости на 86%.[167] другое применение Из-за повышенной теплопроводности графена было найдено в ПЦР.[20]

Справочный материал

Свойства графена позволяют использовать его в качестве эталонного материала для характеристики электропроводящих и прозрачных материалов. Один слой графена поглощает 2,3% красного света.[168]

Это свойство было использовано для определения проводимости прозрачности, которая сочетает в себе сопротивление листа и прозрачность. Этот параметр использовался для сравнения материалов без использования двух независимых параметров.[169]

Тепловое управление

В 2011 году исследователи сообщили, что трехмерная, вертикально выровненная, функционализированная многослойная графеновая архитектура может быть подходом для термоинтерфейсных материалов на основе графена (TIMs) с превосходной теплопроводностью и сверхнизким межфазным тепловым сопротивлением между графеном и металлом.[170]

Графен-металлические композиты могут быть использованы в термоинтерфейсных материалах.[171]

Добавление слоя графена к каждой стороне медной пленки увеличило теплопроводность металла до 24%. Это говорит о возможности их использования для полупроводниковых межсоединений в компьютерных чипах. Улучшение является результатом изменений в нано-и микроструктуре меди, а не от независимого действия графена в качестве дополнительного теплопроводящего канала. Высокотемпературное химическое осаждение из паровой фазы стимулирует рост размера зерен в медных пленках. Большие размеры зерен улучшают теплопроводность. Улучшение теплопроводности было более выражено в более тонких медных пленках, что полезно, поскольку медные межсоединения сжимаются.[172]

Присоединение графена, функционализированного молекулами Силана, увеличивает его теплопроводность (κ) на 15-56% по отношению к численной плотности молекул. Это происходит из-за усиленной внутрислойной теплопроводности, возникающей в результате одновременного увеличения теплового сопротивления между графеном и подложкой, что ограничивает межслойное рассеяние фононов. Способность к распространению тепла удвоилась.[173]

Однако несоответствия на границе между горизонтально расположенными кристаллами снижают теплопередачу в 10 раз.[174]

Конструкционный материал

Прочность, жесткость и легкость графена предполагали его использование с углеродным волокном. Графен был использован в качестве армирующего агента для улучшения механических свойств биоразлагаемых полимерных нанокомпозитов для конструирования костной ткани.[175]

Катализатор

В 2014 году исследователи из Университета Западной Австралии обнаружили, что наноразмерные фрагменты графена могут ускорить скорость химических реакций.[176] в 2015 году исследователи анонсировали катализатор атомарного масштаба, изготовленный из графена, легированного азотом и дополненного небольшим количеством кобальта, начальное напряжение которого было сравнимо с платиновыми катализаторами.[177][178] В 2016 году сообщалось, что железо-азотные комплексы, встроенные в графен, являются еще одной формой катализатора. Утверждалось, что новый материал приближается к эффективности платиновых катализаторов. Этот подход устранил необходимость в менее эффективных наночастицах железа.[179]

Авиация

В 2016 году исследователи разработали прототип противообледенительной системы, которая включала незамкнутые углеродные нанотрубки графеновых нановолокон в эпоксидно-графеновый композит. В лабораторных испытаниях передняя кромка лопасти несущего винта вертолета была покрыта композитом, покрытым защитной металлической втулкой. Применяя электрический ток, композит нагревался более чем до 200 °F (93 °C), плавя слой льда толщиной 1 см (0,4 дюйма) с температурой окружающей среды -4 °F (-20 °C).[180]

См. также

Применение графена в качестве оптических линз

Ссылки

- Мони, Санджай. "Разработки в области токопроводящих красок". Промышленная И Специализированная Печать. Архивирован с оригинала 14 апреля 2014года . Получено 26 Апреля 2010Года .

Geim, A. K.; Kim, P. (Апрель 2008). "Углеродная Страна Чудес". Scientific American. ... кусочки графена несомненно присутствуют в каждом карандашном следе

Сигал, М. (2009). "Продажа графена тоннами". Природа Нанотехнологий. 4 (10): 612–14. Бибкод:2009натна...4..612C. doi:10.1038/nnano.2009.279. PMID 19809441.

Патель, П. (15 Января 2009 Г.). "Более Крупный, Более Эластичный Графен". Обзор технологий Массачусетского технологического института .

Вае, S.; et al. (2010). "Рулонное производство 30-дюймовых графеновых пленок для прозрачных электродов". Природа Нанотехнологий. 5 (8): 574–78. Бибкод:2010натна...5..574B. CiteSeerX 10.1.1.176.439. doi:10.1038/nnano.2010.132. PMID 20562870.

"графеновые биосенсоры-наконец-то коммерческая реальность". www.newelectronics.co.uk. извлечено 9 августа 2017года .

"Europa-Press Release - проект Graphene and Human Brain получил самую крупную награду за выдающиеся научные достижения в истории, поскольку битва за устойчивое финансирование науки продолжается". Europa.eu 28 Января 2013 Года.

Томсон, Иэн. "Nokia разделяет грант ЕС на исследования графена в размере \$ 1,35 млрд". Регистр. "FET Graphene Flagship". Graphene-flagship.eu архивирован с оригинала 5 августа 2013года . Извлечено 24 Августа 2013Года .

Nayak, Tapas R.; Andersen, Henrik; Makam, Venkata S.; Khaw, Clement; Bae, Sukang; Xu, Xiangfan; Ee, Pui-Lai R.; Ahn, Jong-Hyun; Hong, Byung Hee; Pastorin, Giorgia; Özyilmaz, Barbaros (11 Мая 2011). "Графен для контролируемой и ускоренной остеогенной дифференцировки мезенхимальных стволовых клеток человека". *ACS Nano*. 5 (6): 4670–78. arXiv:1104.5120. Бибкод:2011arXiv1104.5120N. doi:10.1021/nn200500h. PMID 21528849. S2CID 20794090.

Tehrani, Z; Burwell, G; Azmi, M A Mohd; Castaing, A; Rickman, R; Almarashi, J; Dunstan, P; Beigi, A Miran; Doak, S H; Guy, O J (19 Сентября 2014). "Универсальные эпитаксиальные графеновые биосенсоры для сверхчувствительного обнаружения биомаркера риска рака" (PDF). 2D материалы. 1 (2): 025004. Бибкод:2014TDM.....1v5004т. doi:10.1088/2053-1583/1/2/025004.

Квит, Нир; Дисатник, Мари-Элен; Шо, Эйкец; Мокли-Розен, Дарья (8 Июня 2016 Года). "Селективный ингибитор фосфорилирования Дельта-протеинкиназы с-пируватдегидрогеназы киназы белок–белковые взаимодействия: применение при повреждении миокарда". *Журнал Американского химического общества*. 138 (24): 7626–35. doi:10.1021 / jacs.6v02724. ПМК 5065007. PMID 27218445.

"Показано, что графен безопасно взаимодействует с нейронами в головном мозге". Кембриджский университет. 29 января 2016года . Проверено 16 Февраля 2016Года .

Lalwani, Gaurav; Henslee, Allan M.; Farshid, Behzad; Lin, Liangjun; Kasper, F. Kurtis; Qin, Yi-Xian; Mikos, Antonios G.; Sitharaman, Balaji (February 27, 2013). "Two-Dimensional Nanostructure-Reinforced Biodegradable Polymeric Nanocomposites for Bone Tissue Engineering". *Biomacromolecules*. 14 (3): 900–09. doi:10.1021/bm301995s. PMC 3601907. PMID 23405887.

Rafiee, M.A.; et al. (December 3, 2009). "Enhanced Mechanical Properties of Nanocomposites at Low Graphene Content". *ACS Nano*. 3 (12): 3884–90. doi:10.1021/nn9010472. PMID 19957928.

Sitharaman, Balaji; Kanakia, Shruti; Toussaint, Jimmy; Mullick Chowdhury, Sayan; Lalwani, Gaurav; Tembulkar, Tanuf; Button, Terry; Shroyer, Kenneth; Moore (August 2013). "Physicochemical characterization of a novel graphene-based magnetic resonance imaging contrast agent". *International Journal of Nanomedicine*. 8: 2821–33. doi:10.2147/IJN.S47062. PMC 3742530. PMID 23946653.

Lalwani, Gaurav; Sundararaj, Joe Livingston; Schaefer, Kenneth; Button, Terry; Sitharaman, Balaji (2014). "Synthesis, characterization, in vitro phantom imaging, and cytotoxicity of a novel graphene-based multimodal magnetic resonance imaging-X-ray computed tomography contrast agent". *J. Mater. Chem. B*. 2 (22): 3519–30. doi:10.1039/C4TB00326H. PMC 4079501. PMID 24999431.

Lalwani, Gaurav; Cai, Xin; Nie, Liming; Wang, Lihong V.; Sitharaman, Balaji (December 2013). "Graphene-based contrast agents for photoacoustic and thermoacoustic tomography". *Photoacoustics*. 1 (3–4): 62–67. doi:10.1016/j.pacs.2013.10.001. PMC 3904379. PMID 24490141.

Mullick Chowdhury, Sayan; Lalwani, Gaurav; Zhang, Kevin; Yang, Jeong Y.; Neville, Kayla; Sitharaman, Balaji (January 2013). "Cell specific cytotoxicity and uptake of graphene nanoribbons". *Biomaterials*. 34 (1): 283–93. doi:10.1016/j.biomaterials.2012.09.057. PMC 3489471. PMID 23072942.

Talukdar, Yahfi; Rashkow, Jason T.; Lalwani, Gaurav; Kanakia, Shruti; Sitharaman, Balaji (June 2014). "The effects of graphene nanostructures on mesenchymal stem cells". *Biomaterials*. 35 (18): 4863–77. doi:10.1016/j.biomaterials.2014.02.054. PMC 3995421. PMID 24674462.

Abdul Khaliq, R; Kafafy, R.; Salleh, H. M.; Faris, W. F. (2012). "Enhancing the efficiency of polymerase chain reaction using graphene nanoflakes". *Nanotechnology*. 23 (45): 455106. doi:10.1088/0957-4484/23/45/455106. PMID 23085573.

Mohanty, Nihar; Berry, Vikas (2008). "Graphene-based Single-Bacterium Resolution Biodevice and DNA-Transistor – Interfacing Graphene-Derivatives with Nano and Micro Scale Biocomponents". *Nano Letters*. 8 (12): 4469–76. Bibcode:2008NanoL...8.4469M. doi:10.1021/nl802412n. PMID 19367973.

Donaldson, L. (2012). "Graphene: Invisible to water". *Materials Today*. 15 (3): 82. doi:10.1016/S1369-7021(12)70037-8.

Xu, M. S. Xu; Fujita, D.; Hanagata, N. (2009). "Perspectives and Challenges of Emerging Single-Molecule DNA Sequencing Technologies". *Small*. 5 (23): 2638–49. doi:10.1002/smll.200900976. PMID 19904762.

"Bill Gates condom challenge 'to be met' by graphene scientists". *BBC News*. November 20, 2013.

Park, Dong-Wook; et al. (October 20, 2014). "Graphene-based carbon-layered electrode array technology for neural imaging and optogenetic applications". *Nature Communications*. 5: 5258. Bibcode:2014NatCo...5.5258P. doi:10.1038/ncomms6258. PMC 4218963. PMID 25327513.

"Transparent graphene-based sensors open new window into the brain". KurzweilAI. October 21, 2014. Retrieved February 26, 2017.

Пресс-Релиз (6 Августа 2014 Года). "Неожиданное открытие может увидеть графен, используемый для улучшения здоровья". Университет Монаша. Архивирован с оригинала 12 августа 2014 года.

Majumder, M; Tkacz, R; Oldenbourg, R; Mehta, S; Miansari, M; Verma, A (2014). "pH-зависимые изотропные нематические фазовые переходы в дисперсиях оксида графена обнаруживают капельные жидкокристаллические фазы". Химическая Связь. 50 (50): 6668–71. doi:10.1039/C4CC00970C. hdl:1912/6739. PMID 24828948.

Пресс-Релиз (6 Января 2015 Года). "Техника"ковра-самолета "использует графен для доставки одного-двух ударов противоопухолевых препаратов". Университет Штата Северная Каролина. ГУ, Чжэнь; и др. (15 декабря 2014 года). "Фурин-опосредованная последовательная доставка противоопухолевого цитокина и Мелкомолекулярного лекарственного средства, перемещаемого графеном". Передовые Материалы. 27 (6): 1021–28. doi:10.1002 / adma.201404498. ПМК 5769919. PMID 25504623.

Алиабади, Маджид; Шагхолани, Хамидреза; Юнесния леги, Араш (май 2017 года). "Синтез нового биосовместимого нанокомпозита оксида графена и магнитных наночастиц для доставки лекарственных средств". Международный журнал биологических макромолекул. 98: 287–291. doi:10.1016 / j. ijbiomac.2017.02.012. ISSN 0141-8130.

Блейкни, Анна К.; Симоновский, Феликс И.; Суйдам, Ян Т.; Ратнер, Бадди Д.; Вудроу, Ким А. (Август 2016 Г.). "Быстрое Биодеградирование PLGA-полиуретановых волокон для устойчивого высвобождения физико-химических разнообразных лекарственных средств". ACS Biomaterials Science & Engineering. 2 (9): 1595–1607. doi:10.1021 / acsbiomaterials.6b00346. ISSN 2373-9878.

Yu, Hui; Yang, Peng; Jia, Yongtang; Zhang, Yumei; Ye, Qiuying; Zeng, Simin (Октябрь 2016). "Регуляция поведения двухфазного высвобождения лекарственных средств оксидом графена в поливинилпирролидоне/Поли(ε-капролактон) ядро / оболочка нановолокнистых матах". Коллоиды и поверхности В: биоинтерфейсы. 146: 63–69. doi:10.1016 / j. colsurfb.2016.05.052. ISSN 0927-7765.

Weber, C; Coester, C; Kreuter, J; Langer, K (Январь 2000). "Процесс десольвации и поверхностная характеристика белковых наночастиц". Международный фармацевтический журнал. 194 (1): 91–102. doi:10.1016/s0378-5173(99) 00370-1. ISSN 0378-5173.

Джеффри, Колин (25 Марта 2015 Года). "Робобуг: ученые покрыли бактерию графеном, чтобы сделать работающего цитобота". Гизмаг. Проверено 25 Февраля 2017Года .

Martin, Steve (18 сентября 2014 года). "Стартап на базе компании Purdue расширяет производство графена, разрабатывает биосенсоры и суперконденсаторы". Университет Пердью. Извлечено 4 Октября 2014Года .

"Startup scales up graphene production, develops biosensors and supercapacitors". R&D Magazine. September 19, 2014. Retrieved October 4, 2014.

Lalwani, Gaurav; D'Agati, Michael; Khan, Amit Mahmud; Sitharaman, Balaji (October 2016). "Toxicology of graphene-based nanomaterials". Advanced Drug Delivery Reviews. 105 (Pt B): 109–44. doi:10.1016/j.addr.2016.04.028. PMC 5039077. PMID 27154267.

Chen, J.; Ishigami, M.; Jang, C.; Hines, D. R.; Fuhrer, M. S.; Williams, E. D. (2007). "Printed graphene circuits". Advanced Materials. 19 (21): 3623–27. arXiv:0809.1634. doi:10.1002/adma.200701059. S2CID 14818151.

"Carbon-Based Electronics: Researchers Develop Foundation for Circuitry and Devices Based on Graphite". March 14, 2006. Archived from the original on April 14, 2009. Retrieved April 13, 2014.

Lemme, M. C.; Echtermeyer, Tim J.; et al. (2007). "A graphene field-effect device". IEEE Electron Device Letters. 28 (4): 282–84. arXiv:cond-mat/0703208. Bibcode:2007IEDL...28..282L. doi:10.1109/LED.2007.891668. S2CID 14555382.

Bullis, K. (January 28, 2008). "Graphene Transistors". Cambridge: MIT Technology Review, Inc.

Kedzierski, J.; Hsu, Pei-Lan; Healey, Paul; Wyatt, Peter W.; Keast, Craig L.; Sprinkle, Mike; Berger, Claire; De Heer, Walt A. (2008). "Epitaxial Graphene Transistors on SiC Substrates". IEEE Transactions on Electron Devices. 55 (8): 2078–85. arXiv:0801.2744. Bibcode:2008ITED...55.2078K. doi:10.1109/TED.2008.926593. S2CID 1176135.

Moon, J.S.; Curtis, D.; Hu, M.; Wong, D.; McGuire, C.; Campbell, P.M.; Jernigan, G.; Tedesco, J.L.; Vanmil, B.; Myers-Ward, R.; Eddy, C.; Gaskill, D.K. (2009). "Epitaxial-Graphene RF Field-Effect Transistors on Si-Face 6H-SiC Substrates". *IEEE Electron Device Letters*. 30 (6): 650–52. Bibcode:2009IEDL...30..650M. doi:10.1109/LED.2009.2020699. S2CID 27018931.

Echtermeyer, Tim. J.; Lemme, M.C.; et al. (2008). "Nonvolatile Switching in Graphene Field-Effect Devices". *IEEE Electron Device Letters*. 29 (8): 952–54. arXiv:0805.4095. Bibcode:2008IEDL...29..952E. doi:10.1109/LED.2008.2001179. S2CID 2096900.

Ponomarenko, L. A.; Schedin, F.; Katsnelson, M. I.; Yang, R.; Hill, E. W.; Novoselov, K. S.; Geim, A. K. (2008). "Chaotic Dirac Billiard in Graphene Quantum Dots". *Science*. 320 (5874): 356–58. arXiv:0801.0160. Bibcode:2008Sci...320..356P. doi:10.1126/science.1154663. PMID 18420930. S2CID 206511356. Lay summary.

"Graphene transistors clocked at 26 GHz Arxiv article". Arxivblog.com. December 11, 2008.

Sordan, R.; Traversi, F.; Russo, V. (2009). "Logic gates with a single graphene transistor". *Appl. Phys. Lett.* 94 (7): 073305. Bibcode:2009ApPhL..94g3305S. doi:10.1063/1.3079663.

Wang, X.; Li, X.; Zhang, L.; Yoon, Y.; Weber, P. K.; Wang, H.; Guo, J.; Dai, H. (2009). "N-Doping of Graphene Through Electrothermal Reactions with Ammonia". *Science*. 324 (5928): 768–71. Bibcode:2009Sci...324..768W. doi:10.1126/science.1170335. PMID 19423822. Lay summary.

"Nanotechnology Information Center: Properties, Applications, Research, and Safety Guidelines". American Elements.

Traversi, F.; Russo, V.; Sordan, R. (2009). "Integrated complementary graphene inverter". *Appl. Phys. Lett.* 94 (22): 223312. arXiv:0904.2745. Bibcode:2009ApPhL..94v3312T. doi:10.1063/1.3148342. S2CID 108877115. Lay summary.

Fiori G., Iannaccone G., "On the possibility of tunable-gap bilayer graphene FET", *IEEE Electr. Dev. Lett.*, 30, 261 (2009)

Fiori G., Iannaccone G., "Ultralow-Voltage Bilayer graphene tunnel FET", *IEEE Electr. Dev. Lett.*, 30, 1096 (2009)

Bourzac, Katherine (February 5, 2010). "Graphene Transistors that Can Work at Blistering Speeds". MIT Technology Review.

"IBM shows off 100GHz graphene transistor". Techworld News. Retrieved December 10, 2010.

Lin; Dimitrakopoulos, C; Jenkins, KA; Farmer, DB; Chiu, HY; Grill, A; Avouris, P (2010). "100-ГГц транзисторы из пластинчатого эпитаксиального графена". *Наука*. 327 (5966): 662. arXiv:1002.3845. Бибкод:2010Sci...327..662Л. doi:10.1126 / science.1184289. PMID 20133565.

"Прорыв европейского сотрудничества в разработке графена". НПЛ. 19 января 2010 года.

Lin, Y.-M.; Dimitrakopoulos, C.; Jenkins, K. A.; Farmer, D. B.; Chiu, H.-Y.; Grill, A.; Avouris, P. (2010). "Транзисторы на частоте 100 ГГц из эпитаксиального графена с пластинчатой шкалой". *Наука*. 327 (5966): 662. arXiv:1002.3845. Бибкод:2010Sci...327..662Л. doi:10.1126 / science.1184289. PMID 20133565.

Lin, Y.-M.; Valdes-Garcia, A.; Han, S.-J.; Farmer, D. B.; Meric, I.; Sun, Y.; Wu, Y.; Dimitrakopoulos, C.; Grill, A.; Avouris, P.; Jenkins, K. A. (2011). "Пластинчатая Графеновая Интегральная Схема". *Наука*. 332 (6035): 1294–97. Бибкод:2011Sci...332.1294 л. doi:10.1126 / science.1204428. PMID 21659599.

Torrisi, F.; Hasan, T.; Wu, W.; Sun, Z.; Lombardo, A.; Kulmala, T.; Hsieh, G. W.; Jung, S. J.; Bonaccorso, F.; Paul, P. J.; Chu, D. P.; Ferrari, A. C. (2012). "Струйная Печатная Графеновая Электроника". *ACS Nano*. 6 (2992): 2992–3006. arXiv:1111.4970. Бибкод:2011arXiv1111. 4970T. doi:10.1021 / nn2044609. PMID 22449258. S2CID 8624837.

Кавано, Юкио (2013). "Широкополосная частотно-перестраиваемая терагерцовая и инфракрасная детекция с графеном". *Нанотехнологии*. 24 (21): 214004. Бибкод:2013нанот..24u4004K. doi:10.1088/0957-4484/24/21/214004. PMID 23618878.

Бритнелл, Л.; Горбачев, Р. В.; Гейм, А. К.; Пономаренко, Л. А.; Мищенко, А.; Гринуэй, М. Т.; Фромхольд, Т. М.; Новоселов, К. С.; Карниз, Л. (2013). "Радикально новый графеновый дизайн работает на терагерцовой скорости". *Природные Коммуникации*. 4 (4): 1794–. arXiv:1303.6864. Бибкод:2013NatCo...4E1794B. doi:10.1038/ncomms2817. ПМК 3644101. PMID 23653206. Извлечено 2 Мая 2013Года .

Бритнелл, Л.; Горбачев, Р. В.; Гейм, А. К.; Пономаренко, Л. А.; Мищенко, А.; Гринуэй, М. Т.; Фромхольд, Т. М.; Новоселов, К. С.; Карниз, Л. (2013). "Резонансное туннелирование и отрицательная дифференциальная проводимость в графеновых транзисторах". Природные Коммуникации. 4: 1794–. arXiv:1303.6864. Бибкод:2013NatCo...4.1794 В. doi:10.1038/ncomms2817. ПМК 3644101. PMID 23653206.

Belle Dumé (June 17, 2013). "Graphene circuit breaks the gigahertz barrier". PhysicsWorld.

Liu, Guanxiong; Ahsan, Sonia; Khitun, Alexander G.; Lake, Roger K.; Balandin, Alexander A. (2013). "Graphene-Based Non-Boolean Logic Circuits". Journal of Applied Physics. 114 (10): 154310–. arXiv:1308.2931. Bibcode:2013JAP...114o4310L. doi:10.1063/1.4824828. S2CID 7788774.

Bourzac, Katherine. "Superfast, Bendable Electronic Switches Made from Graphene | MIT Technology Review". Technologyreview.com. Retrieved August 24, 2013.

"Unlikely graphene-nanotube combination forms high-speed digital switch | KurzweilAI". kurzweilai.net. August 4, 2015. Retrieved February 26, 2017.

"How to change the crystal structure of graphene from metal to semiconductor". KurzweilAI. May 6, 2014. Retrieved June 15, 2014.

Yankowitz, M.; Wang, J. I. J.; Birdwell, A. G.; Chen, Y. A.; Watanabe, K.; Taniguchi, T.; Jacquod, P.; San-Jose, P.; Jarillo-Herrero, P.; Leroy, B. J. (2014). "Electric field control of soliton motion and stacking in trilayer graphene". Nature Materials. 13 (8): 786–89. arXiv:1401.7663. Bibcode:2014NatMa..13..786Y. doi:10.1038/nmat3965. PMID 24776537. S2CID 3812760.

Jain, Nikhil; Bansal, Tanesh; Durcan, Christopher A.; Xu, Yang; Yu, Bin (2013). "Monolayer graphene/hexagonal boron nitride heterostructure". Carbon. 54: 396–402. doi:10.1016/j.carbon.2012.11.054.

Li, Xiaoqiang; Chen, Wenchao; Zhang, Shengjiao; Wu, Zhiqian; Wang, Peng; Xu, Zhijuan; Chen, Hongsheng; Yin, Wenyan; Zhong, Huikai; Lin, Shisheng (September 2015). "18.5% efficient graphene/GaAs van der Waals heterostructure solar cell". Nano Energy. 16: 310–19. arXiv:1409.3500. doi:10.1016/j.nanoen.2015.07.003.

Singh, Khomdram Jolson; Chettri, Dhanu; Singh, Thokchom Jayenta; Thingujam, Terirama; Sarkar, Subir kumar (June 2017). "A performance optimization and analysis of graphene based schottky barrier GaAs solar cell". IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 211 (1): 012024. Bibcode:2017MS&E..211a2024J. doi:10.1088/1757-899X/211/1/012024.

Wang, Xuan; Zhi, Linjie; Müllen, Klaus (January 2008). "Transparent, Conductive Graphene Electrodes for Dye-Sensitized Solar Cells". Nano Letters. 8 (1): 323–27. Bibcode:2008NanoL...8..323W. doi:10.1021/nl072838r. PMID 18069877.

Eda, Goki; Fanchini, Giovanni; Chhowalla, Manish (April 6, 2008). "Large-area ultrathin films of reduced graphene oxide as a transparent and flexible electronic material". Nature Nanotechnology. 3 (5): 270–74. doi:10.1038/nnano.2008.83. PMID 18654522.

Wang, Shu Jun; Geng, Yan; Zheng, Qingbin; Kim, Jang-Kyo (May 2010). "Fabrication of highly conducting and transparent graphene films". Carbon. 48 (6): 1815–23. doi:10.1016/j.carbon.2010.01.027.

Wang, Yu; Chen, Xiaohong; Zhong, Yulin; Zhu, Furong; Loh, Kian Ping (2009). "Large area, continuous, few-layered graphene as anodes in organic photovoltaic devices". Applied Physics Letters. 95 (6): 063302. Bibcode:2009ApPhL..95f3302W. doi:10.1063/1.3204698.

Wu, J.B.; Agrawal, Mukul; Becerril, Héctor A.; Bao, Zhenan; Liu, Zunfeng; Chen, Yongsheng; Peumans, Peter (2010). "Organic Light-Emitting Diodes on Solution-Processed Graphene Transparent Electrodes". ACS Nano. 4 (1): 43–48. doi:10.1021/nn900728d. PMID 19902961.

Jeffrey, Colin (January 10, 2017). "First transparent OLED display with graphene electrodes created". newatlas.com. Retrieved February 17, 2017.

Matyba, P.; Yamaguchi, H; et al. (2010). "Graphene and Mobile Ions: The Key to All-Plastic, Solution-Processed Light-Emitting Devices". ACS Nano. 4 (2): 637–42. CiteSeerX 10.1.1.474.2436. doi:10.1021/nn9018569. PMID 20131906.

Jeffrey, Colin (September 11, 2014). "First flexible graphene-based display created". Gizmag. Retrieved February 26, 2017.

Lavars, Nick (November 7, 2016). "More pop might be in store for e-readers thanks to colorful graphene balloons". newatlas.com. Retrieved April 30, 2017.

Wang, H.; Nezich, D.; Kong, J.; Palacios, T. (2009). "Graphene Frequency Multipliers". IEEE Electron Device Letters. 30 (5): 547–49. Bibcode:2009IEDL...30..547H. doi:10.1109/LED.2009.2016443. hdl:1721.1/54736. S2CID 9317247. Lay summary.

Cricchio, D.; Corso, P. P.; Fiordilino, E.; Orlando, G.; Persico, F. (2009). "A paradigm of fullerene". J. Phys. B. 42 (8): 085404. Bibcode:2009JPhB...42h5404C. doi:10.1088/0953-4075/42/8/085404.

Kusmartsev, F. V.; Wu, W. M.; Pierpoint, M. P.; Yung, K. C. (2014). "Application of Graphene within Optoelectronic Devices and Transistors". arXiv:1406.0809 [cond-mat.mtrl-sci].

Petruck, O.; Szewczyk, R.; Ciuk, T.; et al. (2014). Тестирование чувствительности и напряжения смещения в датчиках Холла, изготовленных из графена. Достижения в области интеллектуальных систем и вычислений. 267. Прыгун. стр. 631-40. doi:10.1007/978-3-319-05353-0_60. ISBN 978-3-319-05352-3.

Dauber, Jan; Sagade, Abhay A.; Oellers, Martin; Watanabe, Kenji; Taniguchi, Takashi; Neumaier, Daniel; Stampfer, Christoph; Ahn, Jong-Hyun; Byung Hee Hong; Pastorin, Giorgia; Özyilmaz, Barbaros (2015). "Сверхчувствительные датчики Холла на основе графена, инкапсулированного в гексагональный нитрид бора". Письма По Прикладной Физике. 106 (19): 193501. arXiv:1504.01625. Бибкод:2015aphl.106c3501d. doi:10.1063/1.4919897. S2CID 118670440.

Mohanty, Nihar; Moore, David; Xu, Zhiping; Sreepasad, T. S.; Nagaraja, Ashvin; Rodriguez, Alfredo A.; Berry, Vikas (2012). "Производство переносимых и Диспергируемых графеновых наноструктур контролируемой формы и размера на основе нанотомии". Природные Коммуникации. 3 (5): 844. Бибкод:2012NatCo...3E. 844M. doi:10.1038/ncomms1834. PMID 22588306.

Цзиньминь, Цай; Руффье, Паскаль; Джафар, Рахед; Бьери, Марко; Браун, Томас; Бланкенбург, Стефан; Муот, Маттиас; Зайцонен, Ари П.; Салех, Мусса; Фенг, Синлян; Мюллен, Клаус; Фазель, Роман (2010). "Атомно точное изготовление графеновых нановолокон снизу вверх". Природа. 466 (7305): 470–73. Бибкод:2010натур.466..470C. doi:10.1038 / nature09211. PMID 20651687. S2CID 4422290.

Wang, Z. F.; Shi, Q. W.; Li, Q.; Wang, X.; Hou, J. G.; Zheng, H.; Yao, Yao; Chen, Jie (2007). "Z-образное графеновое нановолоконное квантово-точечное устройство". Письма По Прикладной Физике. 91 (5): 053109. arXiv:0705.0023. Бибкод:2007aphl..91e3109W. doi:10.1063/1.2761266.

Фэй, Хуэйлун; Йе, Рукуань; Йе, Гонлан; Гун, Юнцзи; Пэн, Чживэй; Фань, Сюэцзюнь; Сэмюэл, Эррол Л. Г.; Аджаян, Пуликель М.; Тур, Джеймс М. (Октябрь 2014 Г.). "Легированные бором и азотом графеновые квантовые точки/графеновые гибридные Нанопластинки в качестве эффективных Электрокатализаторов восстановления кислорода". ACS Nano. 8 (10): 10837–43. doi:10.1021/nn504637y. PMID 25251218.

Василий Скрипничук; и др. (4 февраля 2015 года). "Аннотация усиленного вертикального переноса заряда в полупроводниковой тонкой пленке РЗНТ на однослойном графене". Продвинутое Функциональные Материалы. 25 (5): 664–70. doi:10.1002 / adfm.201403418.

"Открытие может привести к созданию более мощных органических электронных устройств на основе графена". KurzweilAI. 23 февраля 2015года . Проверено 25 Февраля 2017Года .

"графен, перспективный для будущих высокоэффективных спинтронных процессоров / KurzweilAI". www.kurzweilai.net. April 10, 2015. Извлечено 12 Октября 2015Года .

"Что такое графен?". www.graphene-info.com. извлечено 11 октября 2018года .

"VORBECK Products RFID". vorbeck.com -материалы Форбека. Проверено 11 Октября 2018Года .

Liu, Ming; Yin; Xiaobo; Ulin-Avila; Erick; Geng; Baisong; Zentgraf; Thomas; Ju; Long; Wang; Feng; Zhang; Xiang (8 Мая 2011 Года). "Широкополосный оптический модулятор на основе графена". Природа. 474 (7349): 64–67. Бибкод:2011натур.474...64L. doi:10.1038 / nature10067. PMID 21552277. S2CID 2260490.

Ян, Лунчжи; Ху, Тин; Хао, РАН; Цю, Чэнь; Сюй, Чао; Юй, Хуэй; Сюй, Ян; Цзян, Сяоцин; Ли, Юбо; Ян, Цзянь (2013). "Низкочастотный модулятор с высоким коэффициентом экстинкции на основе графен-кремниевого волновода". Оптика Письма. 38 (14): 2512–15. Бибкод:2013OptL...38.2512 г. doi:10.1364 / OL.38.002512. PMID 23939097.

Ван, Цзюнься; Сюй, Ян; Чэнь, Хуншэн; Чжан, Бейле (2012). "Ультрафиолетовые диэлектрические гиперлинзы со слоистым графеном и нитридом бора". Журнал химии материалов. 22 (31): 15863. arXiv:1205.4823. Бибкод:2012arXiv1205. 4823W. doi:10.1039 / C2JM32715E. S2CID 55316208.

Шонди, Дэвид (31 Января 2016 Года). "Графеновая оптическая линза толщиной в одну миллиардную метра нарушает дифракционный предел". newatlas.com. извлечено 18 февраля 2017года .

Скотт, Камерон (29 Марта 2014 Г.). - Контактные линзы с инфракрасным зрением? Ультратонкий графен открывает новые возможности". Центр Сингулярности. Извлечено 6 Апреля 2014Года .

Li, Xinming; Zhu, Miao; Du, Mingde; Lv, Zheng; Zhang, Li; Li, Yuanchang; Yang, Yao; Yang, Tingting; Li, Xiao; Wang, Kunlin; Zhu, Hongwei; Fang, Ying (2016). "Высокодетективный Графен-Кремниевый Гетеропереходный Фотоприемник". Маленький. 12 (5): 595–601. doi:10.1002 / smll.201502336. PMID 26643577.

Юй, Тин; Ван, Фэн; Сюй, Ян; Ма, Линлин; Пи, Сяодун; Ян, Дерен (2016). "Графен в сочетании с кремниевыми квантовыми точками для высокопроизводительных объемных фотоприемников на основе кремния Шоттки". Передовые Материалы. 28 (24): 4912–19. doi:10.1002 / adma.201506140. PMID 27061073.

Наир, Р. Р.; Ву, Х. А.; Джаярам, П. Н.; Григорьева, И. В.; Гейм, А. К. (2012). "Беспрепятственное проникновение воды через гелиевые герметичные мембраны на основе графена". Наука. 335 (6067): 442–44. arXiv:1112.3488. Бибкод:2012Sci...335..442Н. doi:10.1126 / science.1211694. PMID 22282806. S2CID 15204080.

Исследование намекает на фотоэлектрический потенциал графена, недавно обнаруженные свойства означают, что графен может быть высокоэффективным преобразователем света в электрическую энергию, Майк Оркатт, Массачусетский технологический институт . 1 марта 2013 года.

Zhu, Shou-En; Yuan, Shengjun; Janssen, G. C. A. M. (October 1, 2014). "Optical transmittance of multilayer graphene". EPL. 108 (1): 17007. arXiv:1409.4664. Bibcode:2014EL....10817007Z. doi:10.1209/0295-5075/108/17007. S2CID 73626659.

Mukhopadhyay, Prithu (2013). Graphite, Graphene and their Polymer Nanocomposites. Boca Raton, Florida: Taylor & Francis Group. pp. 202–13. ISBN 978-1-4398-2779-6.

"Graphene organic photovoltaics: Flexible material only a few atoms thick may offer cheap solar power". ScienceDaily. July 24, 2010.

Walker, Sohia (August 4, 2010). "Use of graphene photovoltaics as alternate source of energy". Computer Talks.

inhabitat.com cooperating with ICFO (Institute of Photonic Sciences)(2013-04-03)

Li, Xinming; Zhu, Hongwei; Wang, Kunlin; Cao, Anyuan; Wei, Jinqun; Li, Chunyan; Jia, Yi; Li, Zhen; Li, Xiao; Wu, Dehai (April 9, 2010). "Graphene-On-Silicon Schottky Junction Solar Cells". Advanced Materials. 22 (25): 2743–48. doi:10.1002/adma.200904383. PMID 20379996.

Li, Xinming; Xie, Dan; Park, Hyesung; Zeng, Tingying Helen; Wang, Kunlin; Wei, Jinqun; Zhong, Minlin; Wu, Dehai; Kong, Jing; Zhu, Hongwei (April 19, 2013). "Anomalous Behaviors of Graphene Transparent Conductors in Graphene–Silicon Heterojunction Solar Cells". Advanced Energy Materials. 3 (8): 1029–34. doi:10.1002/aenm.201300052.

Li, Xinming; Xie, Dan; Park, Hyesung; Zhu, Miao; Zeng, Tingying Helen; Wang, Kunlin; Wei, Jinqun; Wu, Dehai; Kong, Jing; Zhu, Hongwei (January 3, 2013). "Ion doping of graphene for high-efficiency heterojunction solar cells". Nanoscale. 5 (5): 1945–48. Bibcode:2013Nanos...5.1945L. doi:10.1039/C2NR33795A. PMID 23358527.

Song, Yi; Li, Xinming; MacKin, Charles; Zhang, Xu; Fang, Wenjing; Palacios, Tomás; Zhu, Hongwei; Kong, Jing (February 16, 2015). "Role of Interfacial Oxide in High-Efficiency Graphene–Silicon Schottky Barrier Solar Cells". Nano Letters. 15 (3): 2104–10. Bibcode:2015NanoL..15.2104S. doi:10.1021/nl505011f. PMID 25685934.

Li, Xinming; Lv, Zheng; Zhu, Hongwei (September 30, 2015). "Carbon/Silicon Heterojunction Solar Cells: State of the Art and Prospects". Advanced Materials. 27 (42): 6549–74. doi:10.1002/adma.201502999. PMID 26422457.

"Graphene-based solar cell hits record 15.6 percent efficiency". Gizmag.com. January 15, 2014. Retrieved January 23, 2014.

Wang, J. T. W.; Ball, J. M.; Barea, E. M.; Abate, A.; Alexander-Webber, J. A.; Huang, J.; Saliba, M.; Mora-Sero, I. N.; Bisquert, J.; Snaith, H. J.; Nicolas, R. J. (2013). "Low-temperature processed electron

collection layers of Graphene/TiO₂ nanocomposites in thin film perovskite solar cells". *Nano Letters*. 14 (2): 724–30. Bibcode:2014NanoL..14..724W. doi:10.1021/nl403997a. PMID 24341922.

Jeffrey, Colin (September 11, 2015). "High-efficiency, semi-transparent perovskite/graphene solar cells created at low cost". *www.gizmag.com*. Retrieved October 13, 2015.

"Protons found to pass through graphene, raising hopes for efficient fuel cells". *KurzweilAI*. December 1, 2014. Retrieved February 25, 2017.

Holmes, Stuart M.; Balakrishnan, Prabhuraj; Kalangi, Vasu. S.; Zhang, Xiang; Lozada-Hidalgo, Marcelo; Ajayan, Pulickel M.; Nair, Rahul R. (November 2016). "2D Crystals Significantly Enhance the Performance of a Working Fuel Cell" (PDF). *Advanced Energy Materials*. 7 (5): 1601216. doi:10.1002/aenm.201601216.

Ху, С.; Лосада-Идальго, М.; Ван, Ф. С.; Мищенко, А.; Schedin, Ф.; Наир, Р. Р.; Хилл, У.; Boukhvalov, Д. В.; Кацнельсон, М. И.; Этот Драйф, Р. А. В.; Григорьева, И. В.; Ву, Х. А.; Гейм А. К. (26 Ноября 2014). "Перенос протонов через кристаллы толщиной в один атом". *Природа*. 516 (7530): 227–30. arXiv:1410.8724. Бибкод:2014натур.516..227Ч. doi:10.1038 / nature14015. PMID 25470058. S2CID 4455321.

"Несовершенный графен может привести к быстрой зарядке аккумуляторов для транспортных средств". 17 марта 2015года . Проверено 26 Февраля 2017Года .

Achtyl, Дженнифер Л.; Unocic, Рэймонд Р.; Сюй Лицзюнь; Цай, Ю.; Раджу, Muralikrishna; Чжан Вэйвэй; Sacci, Роберт Л.; Vlassiouk, И. В.; Фульвио, Паскуале Ф.; Ганеш, Рачаракесан; Весоловски, Дэвид Дж; дай, Шэн; Дуин, Адри С. Т. Ван; Neurock, Мэтью; Гейгера, Франц м. (17 марта 2015). "Водный перенос протонов через однослойный графен". *Природные Коммуникации*. 6: 6539. arXiv:1411.1034. Бибкод:2015NatCo...6.6539 а. doi:10.1038/ncomms7539. ЧВК 4382684. PMID 25781149.

Singh, Chanderpratap; S., Nikhil; Jana, Anwesha; Mishra, Ashish Kumar; Paul, Amit (2016). "Протонная проводимость через кислород функционализировала малослойный графен". *Химическая Связь*. 52 (85): 12661–64. doi:10.1039 / с6cc07231с. PMID 27722614.

"Горячая штука". *Экономист*. 1 августа 2015 года. ISSN 0013-0613. Извлечено 11 Октября 2015Года .

Вуд, Крис (2 Июня 2015 Года). "Покрытие конденсаторов графеном может повысить эффективность работы электростанций". *www.gizmag.com*. извлечено 14 октября 2015года .

Столлер, Мерил Д.; Парк, Сунджин; Чжу, Янву; Ан, Джинхо; Руофф, Родни С. (2008). "Ультраконденсаторы на основе графена" (PDF). *Нано Латук*. 8 (10): 3498–502. Бибкод:2008наноL...8.3498 С. doi:10.1021/nl802558у. PMID 18788793. Архивировано с оригинала (PDF) 20 марта 2013 года.

Malasarn, Davin (19 Февраля 2013). "Исследователи из Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе разрабатывают новую технику для расширения производства графеновых микро-суперконденсаторов / UCLA Newsroom". *Newsroom.ucla.edu*-да.

Уильямс, Майк (14 Января 2015 Года). "Лазерно-индуцированный графен "супер" для электроники". *R & D Magazine*. Проверено 20 Февраля 2015Года .

"Flexible 3D graphene supercapacitors may power portables and wearables". *Kurzweil Accelerating Intelligence*. February 9, 2015. Retrieved February 25, 2017.

Mason, Shaun (April 1, 2015). "Quick-charging hybrid supercapacitors". *R&D*. Retrieved April 1, 2015.

Maher F. El-Kady; Melanie Ihns; Mengping Li; Jee Youn Hwang; Mir F. Mousavi; Lindsay Chaney; Andrew T. Lech; Richard B. Kaner (March 4, 2015). "Engineering three-dimensional hybrid supercapacitors and microsupercapacitors for high-performance integrated energy storage". *PNAS*. 112 (14): 4233–38. Bibcode:2015PNAS..112.4233E. doi:10.1073/pnas.1420398112. PMC 4394298. PMID 25831542. Retrieved February 26, 2017.

"Wearables and electric vehicles may get boost from boron-infused graphene | KurzweilAI". *www.kurzweilai.net*. May 19, 2015. Retrieved October 14, 2015.

Peng, Zhiwei; Ye, Ruquan; Mann, Jason A.; Zakhidov, Dante; Li, Yilun; Smalley, Preston R.; Lin, Jian; Tour, James M. (May 19, 2015). "Flexible Boron-Doped Laser-Induced Graphene Microsupercapacitors". *ACS Nano*. 9 (6): 5868–75. doi:10.1021/acsnano.5b00436. PMID 25978090.

Johnson, Dexter (March 21, 2012). "Graphene-Silicon Anodes for Li-ion Batteries Go Commercial – IEEE Spectrum". *Spectrum.ieee.org*.

"XGS presents new silicon-graphene anode materials for lithium-ion batteries". Phys.org. Retrieved February 26, 2014.

David, L.; Bhandavat, R.; Kulkarni, G.; Pahwa, S.; Zhong, Z.; Singh, G. (2013). "Synthesis of Graphene Films by Rapid Heating and Quenching at Ambient Pressures and Their Electrochemical Characterization". *ACS Applied Materials & Interfaces*. 5 (3): 546–52. doi:10.1021/am301782h. PMID 23268553.

Radhakrishnan, Gouri; Cardema, Joanna D.; Adams, Paul M.; Kim, Hyun I.; Foran, Brendan (2012). "Fabrication and Electrochemical Characterization of Single and Multi-Layer Graphene Anodes for Lithium-Ion Batteries". *Journal of the Electrochemical Society*. 159 (6): A752–61. doi:10.1149/2.052206jes.

Yao, F.; Güneş, F.; Ta, H. Q.; Lee, S. M.; Chae, S. J.; Sheem, K. Y.; Cojocaru, C. S.; Xie, S. S.; Lee, Y. H. (2012). "Diffusion Mechanism of Lithium Ion through Basal Plane of Layered Graphene". *Journal of the American Chemical Society*. 134 (20): 8646–54. CiteSeerX 10.1.1.400.2791. doi:10.1021/ja301586m. PMID 22545779.

Johnson, Dexter (January 17, 2013). "Faster and Cheaper Process for Graphene in Li-ion Batteries". *Spectrum.ieee.org – IEEE Spectrum*.

5 Ways Graphene Will Change Gadgets Forever, Laptop, 14 April 2014, Michael Andronico

"Charged holes in graphene increase energy storage capacity | KurzweilAI". *www.kurzweilai.net*. April 23, 2015. Retrieved October 14, 2015.

Narayanan, R.; Yamada, H.; Karakaya, M.; Podila, R.; Rao, A. M.; Bandaru, P. R. (April 2, 2015). "Modulation of the Electrostatic and Quantum Capacitances of Few Layered Graphenes through Plasma Processing". *Nano Letters*. 15 (5): 3067–72. Bibcode:2015NanoL..15.3067N. doi:10.1021/acs.nanolett.5b00055. PMID 25826121.

Black, Douglas (December 6, 2016). "Huawei boost batteries with graphene-reinforced Li-ion technology". *Notebookcheck*. Retrieved July 25, 2020.

"Huawei Achieves Major Breakthrough in Graphene-Assisted High Temperature Li-ion Batteries - huawei press center". *huawei*. December 6, 2016. Retrieved July 25, 2020.

Lynch, Gerald (December 6, 2016). "Huawei's next battery breakthrough is a graphene-powered gain". *TechRadar*. Retrieved July 25, 2020.

"Graphene Biosensors". *Graphenea*. Retrieved August 9, 2017.

Xu, Yang; Guo, Zhendong; Chen, Huabin; Yuan, You; Lou, Jiechao; Lin, Xiao; Gao, Haiyuan; Chen, Hongsheng; Yu, Bin (2011). "In-plane and tunneling pressure sensors based on graphene/hexagonal boron nitride heterostructures". *Applied Physics Letters*. 99 (13): 133109. Bibcode:2011ApPhL..99m3109X. doi:10.1063/1.3643899.

Coxworth, Ben (December 9, 2016). "Silly Putty smartens up, with a dash of graphene". *newatlas.com*. Retrieved April 30, 2017.

Yan, Shaping; Xu, Yang; Jin, Zhonghe; Wang, Yuelin (2010). "Quantum Squeezing Effects of Monolayer Graphene NEMS". *AIP Conference Proceedings*: 785–86. doi:10.1063/1.3666611.

Dan, Yaping; Lu, Ye; Kybert, Nicholas J.; Luo, Zhengtang; Johnson, A. T. Charlie (April 2009). "Intrinsic Response of Graphene Vapor Sensors". *Nano Letters*. 9 (4): 1472–75. arXiv:0811.3091. Bibcode:2009NanoL...9.1472D. doi:10.1021/nl8033637. PMID 19267449. S2CID 23190568.

Щедин, Ф.; Гейм, А. К.; Морозов, С. В.; Хилл, Э. В.; Блейк, П.; Кацнельсон, М. И.; Новоселов, К. С. (2007). "Обнаружение отдельных молекул газа, адсорбированных на графене". *Природные Материалы*. 6 (9): 652–55. arXiv:cond-mat/0610809. Бибкод:2007натма...6..652С. doi:10.1038 / nmat1967. PMID 17660825. S2CID 3518448.

"Стрейнтроника: инженеры Стэнфорда создают пьезоэлектрический графен". *Стэнфордский университет*. 3 апреля 2012 года.

Ong, M.; Reed, Evan J. (2012). "Инженерное пьезоэлектричество в графене". *ACS Nano*. 6 (2): 1387–94. doi:10.1021/nn204198g. PMID 22196055.

Li, Xinming; Yang, Tingting; Yang, Yao; Zhu, Jia; Li, Li; Alam, Fakhr E.; Li, Xiao; Wang, Kunlin; Cheng, Huanyu; Lin, Cheng-Te; Fang, Ying; Zhu, Hongwei (2016). "Крупногабаритные ультратонкие графеновые пленки методом одноступенчатой самосборки Марангони для

высококочувствительного тензодатчика". Продвинутые Функциональные Материалы. 26 (9): 1322–29. doi:10.1002 / adfm.201504717.

Boland, C. S.; Khan, U.; Backes, C.; o'Neill, A.; McCauley, J.; Duane, S.; Shanker, R.; Liu, Y.; Jurewicz, I.; Dalton, A. B.; Coleman, J. N. (2014). "Чувствительные, Высоконапряженные, высокоскоростные датчики движения тела на основе графен-каучуковых композитов". ACS Nano. 8 (9): 8819–30. doi:10.1021/nn503454h. PMID 25100211.

Седжмор, Фрэнсис (29 Июня 2015 Г.). "Bosch объявляет о прорыве в технологии графеновых сенсоров". НИОКР. Получено 26 Сентября 2015Года .

Cohen-Tanugi, David; Grossman, Jeffrey C. (2012). "Опреснение воды через нанопористый графен". Нано-Письма. 12 (7): 3602–08. Бибкод:2012нанол..12.3602 С. doi:10.1021 / nl3012853. PMID 22668008.

Choi, Kyoungjun; et al. (2015). "Снижение скорости пропускания водяного пара графеновых Газобарьерных пленок для гибких органических полевых транзисторов". ACS Nano. 9 (6): 5818–24. doi:10.1021 / acsnano.5v01161. PMID 25988910.

Сагаде, Абхай и др. (2017). "Наноламинаты на основе графена как сверхвысокие барьеры проницаемости". NPJ 2D материалы и приложения. 1: 35. doi:10.1038/s41699-017-0037-3.

Zeng, S.; et al. (2015). "Архитектура метаповерхностей графен-золото для сверхчувствительного плазмонного биосенсирования" (PDF). Передовые Материалы. 27 (40): 1–7. doi:10.1002 / adma.201501754. PMID 26349431.

Chen, J.; Badioli, M.; Alonso-González, P.; Thongrattanasiri, S.; Huth, F.; Osmond, J.; Spasenović, M.; Centeno, A.; Pesquera, A.; Godignon, P.; Zurutuza Elorza, A.; Camara, N.; De Abajo, F. J. G. A.; Hillenbrand, R.; Koppens, F. H. L. (2012). "Оптическое наноизображение перестраиваемых затворами графеновых плазмонов". Природа. 487 (7405): 77–81. arXiv:1202.4996. Бибкод:2012натур.487...77с. doi:10.1038 / nature11254. PMID 22722861. S2CID 4431470.

Fei, Z.; Rodin, A. S.; Andreev, G. O.; Bao, W.; McLeod, A. S.; Wagner, M.; Zhang, L. M.; Zhao, Z.; Thiemens, M.; Dominguez, G.; Fogler, M. M.; Neto, A. H. C.; Lau, C. N.; Keilmann, F.; Basov, D. N. (2012). "Gate-tuning of graphene plasmons revealed by infrared nano-imaging". Nature. 487 (7405): 82–85. arXiv:1202.4993. Bibcode:2012Natur.487...82F. doi:10.1038/nature11253. PMID 22722866. S2CID 4348703.

Yan, H.; Low, T.; Zhu, W.; Wu, Y.; Freitag, M.; Li, X.; Guinea, F.; Avouris, P.; Xia, F. (2013). "Damping pathways of mid-infrared plasmons in graphene nanostructures". Nature Photonics. 7 (5): 394–99. arXiv:1209.1984. Bibcode:2013NaPho...7..394Y. doi:10.1038/nphoton.2013.57.

Low, T.; Avouris, P. (2014). "Graphene Plasmonics for Terahertz to Mid-Infrared Applications". ACS Nano. 8 (2): 1086–101. arXiv:1403.2799. Bibcode:2014arXiv1403.2799L. doi:10.1021/nn406627u. PMID 24484181. S2CID 8151572.

Rodrigo, D.; Limaj, O.; Janner, D.; Etezadi, D.; Garcia de Abajo, F.J.; Pruneri, V.; Altug, H. (2015). "Mid-infrared plasmonic biosensing with graphene". Science. 349 (6244): 165–68. arXiv:1506.06800. Bibcode:2015Sci...349..165R. doi:10.1126/science.aab2051. PMID 26160941. S2CID 206637774.

Graphene proves a long-lasting lubricant, Phys.org, 14 October 2014, Jared Sagoff

"Graphene found to efficiently absorb radio waves". KurzweilAI. Retrieved February 26, 2014.

Wu, B.; Tuncer, H. M.; Naeem, M.; Yang, B.; Cole, M. T.; Milne, W. I.; Hao, Y. (2014). "Experimental demonstration of a transparent graphene millimetre wave absorber with 28% fractional bandwidth at 140 GHz". Scientific Reports. 4: 4130. Bibcode:2014NatSR...4E4130W. doi:10.1038/srep04130. PMC 3928574. PMID 24549254.

Ekiz, O.O.; Urel, M; et al. (2011). "Reversible Electrical Reduction and Oxidation of Graphene Oxide". ACS Nano. 5 (4): 2475–82. doi:10.1021/nn1014215. hdl:11693/13319. PMID 21391707.

Ekiz, O.O.; Urel, M; et al. (2011). "Supporting information for Reversible Electrical Reduction and Oxidation of Graphene Oxide". ACS Nano. 5 (4): 2475–82. doi:10.1021/nn1014215. hdl:11693/13319. PMID 21391707.

Dodson, Brian (February 3, 2014). "Graphene-based nano-antennas may enable cooperating smart dust swarms". Gizmag.com. Retrieved April 6, 2014.

"Optical antennas trap and control light with the help of graphene". May 23, 2014.

Ren, Xingang; Sha, Wei E. I.; Choy, Wallace C. H. (2013). "Tuning optical responses of metallic dipole nanoantenna using graphene". *Optics Express*. 21 (26): 31824–29. Bibcode:2013OExpr..2131824R. doi:10.1364/OE.21.031824. hdl:10722/202884. PMID 24514777.

"World's first graphene speaker already superior to Sennheiser MX400". Gizmag.com. April 16, 2014. Retrieved April 24, 2014., full paper on arxiv.org

Qin Zhoua; Jinglin Zhenga; Seita Onishi; M. F. Crommiea; Alex K. Zettl (July 21, 2015). "Graphene electrostatic microphone and ultrasonic radio" (PDF). *PNAS*. 112 (29): 8942–46. Bibcode:2015PNAS..112.8942Z. doi:10.1073/pnas.1505800112. PMC 4517232. PMID 26150483.

Yu, W.; Xie, H.; Wang, X.; Wang, X. (2011). "Significant thermal conductivity enhancement for nanofluids containing graphene nanosheets". *Physics Letters A*. 375 (10): 1323–28. Bibcode:2011PhLA..375.1323Y. doi:10.1016/j.physleta.2011.01.040.

Nair, R. R.; Blake, P.; Grigorenko, A. N.; Novoselov, K. S.; Booth, T. J.; Stauber, T.; Peres, N. M. R.; Geim, A. K. (2008). "Fine Structure Constant Defines Visual Transparency of Graphene". *Science*. 320 (5881): 1308. arXiv:0803.3718. Bibcode:2008Sci...320.1308N. doi:10.1126/science.1156965. PMID 18388259.

Eigler, S. (2009). "A new parameter based on graphene for characterizing transparent, conductive materials". *Carbon*. 47 (12): 2936–39. doi:10.1016/j.carbon.2009.06.047.

Liang, Qizhen; Yao, Xuxia; Wang, Wei; Liu, Yan; Wong, Ching Ping (2011). "A Three-Dimensional Vertically Aligned Functionalized Multilayer Graphene Architecture: An Approach for Graphene-Based Thermal Interfacial Materials". *ACS Nano*. 5 (3): 2392–2401. doi:10.1021/nn200181e. PMID 21384860.

Amini, Shaahin; Garay, Javier; Liu, Guanxiong; Balandin, Alexander A.; Abbaschian, Reza (2010). "Growth of Large-Area Graphene Films from Metal-Carbon Melts". *Journal of Applied Physics*. 108 (9): 094321–. arXiv:1011.4081. Bibcode:2010JAP...108i4321A. doi:10.1063/1.3498815. S2CID 17739020.

Нилон, Шон (12 Марта 2014 Года). "Сэндвич графен-медь может улучшить, уменьшить электронику". Rdmag.com Проверено 6 Апреля 2014 Года .

"Использование пленки на основе графена для эффективного охлаждения электроники | Курцвейлай". www.kurzweilai.net. July 13, 2015. Получено 26 Сентября 2015 Года .

Галатцер-Леви, Жанна (17 Июня 2015 Г.). "Разгадана загадка теплопередачи графена". НИОКР. Получено 26 Сентября 2015 Года .

Lalwani, G; Henslee, A. M.; Farshid, B; Lin, L; Kasper, F. K.; Qin, Y. X.; Mikos, A. G.; Sitharaman, B (2013). "Двумерные наноструктурно-армированные биоразлагаемые полимерные нанокомпозиты для инженерии костной ткани". *Биомакромолекулы*. 14 (3): 900–09. doi:10.1021 / bm301995s. PMC 3601907. PMID 23405887.

Исследование открывает потенциал супер-соединения, Phys.org, 22 октября 2014 года, Дэвид Стейси

Уильямс, Майк (21 Октября 2015 Г.). "Атомы кобальта на графене-мощная комбинация". Извлечено 29 Апреля 2017 Года .

Фэй, Квидонга; Донг, Juncai; Арельяно-Хименес, М. Жозефина, Вы, Gonglan; Ким Донг, Вьетнам; Самуил, Эррол Л. Г.; Пэн, Живей; Чжу, Чжуань; Цинь, Вентилятор; Бао Цзимины; Ясапан, Мигель Хосе; Аджаян, Pulickel M.; Чен, Дунлян; Тур, Джеймс М. (21 Октября 2015). "Атомарный кобальт на легированном азотом графене для получения водорода". *Природные Коммуникации*. 6 (1): 8668. Бибкод:2015NatCo...6.8668 F. doi:10.1038/ncomms9668. ПМК 4639894. PMID 26487368.

Крамм, Ульрике И.; Германн-Гепперт, Айрис; Берендс, Ян; Липс, Клаус; Фихтер, Себастьян; Богданов, Питер (4 Января 2016 Года). "О простом способе получения легированного металлом азота углерода с исключительным присутствием участков типа MeN₄, активных для Оpp". *Журнал Американского химического общества*. 138 (2): 635–40. doi:10.1021 / jacs.5b11015. PMID 26651534.

Коксворт, Бен (27 Января 2016 Года). "Щепотка графена могла бы сохранить крылья самолета незамерзающими". newatlas.com. извлечено 18 февраля 2017 года .