

Светодиодами кремниевые устройства: итог 2005 г.

Упорные усилия исследователей в различных лабораториях мира приближают время, когда кремний - базовый элемент микроэлектроники и солнечной энергетики, станет использоваться и для изготовления устройств светоизлучательной оптоэлектроники и квантовой электроники, таких как светодиоды, оптические усилители и лазеры. Напомним, что основная проблема кристаллического кремния (*c-Si*) заключается в отсутствии прямых электронных переходов между зонами, вследствие чего излучательная рекомбинация носителей заряда (электронов и дырок) имеет невысокую вероятность.

Работа по повышению вероятности испускания света из *c-Si* и других материалов на основе *Si* вот уже лет 10 идет широким фронтом, на различных участках которого, время от времени, случаются прорывы, но иногда, правда, бывают и затишья, и отступления. Минувший год не стал исключением.

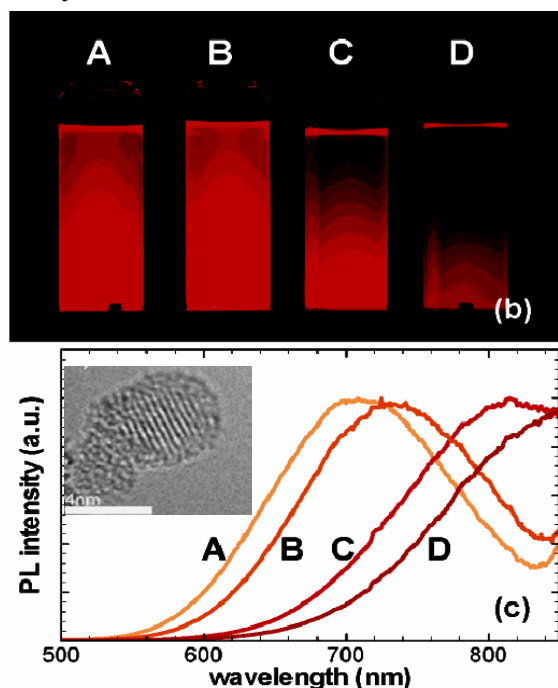


Рис.1. Фотолюминесценция, возбуждаемая УФ лампой при 365 нм (b) и спектр фотолюминесценции (c) от *Si* нанокристаллов, диспергированных в метаноле. Образцы А, В, С, D получены в различных технологических условиях.

По-прежнему в качестве одного из перспективных подходов к повышению выхода оптического излучения рассматривается использование квантового размерного эффекта, для чего совершен-

ствуются методы формирования наноструктур на основе *Si*. И, если раньше в качестве основного материала рассматривался пористый кремний, получаемый травлением *c-Si* в растворах плавиковой кислоты, то теперь внимание сосредоточено на технологически более удобных и, самое главное, более стабильных наноструктурах. Так группа исследователей из Univ. Minnesota (США) в работе [1] сообщила о практически промышленном методе формирования люминесцирующих кремниевых нанокристаллов со средними размерами от 2 до 8 нм, сравнительно узким распределением по размерам (0.5-0.7 нм) и производительностью 14-52 мг/ч. Нанокристаллы получали при высокочастотном разложении силана, методе

И далее ...

СНОВА К ОСНОВАМ

- 4 Выключатель скорости света

НАНОСТРУКТУРЫ

- 5 Католюминесценция и наноструктуры

- 6 Терагерцы текут каскадами

СВЕРХПРОВОДНИКИ И МАНГАНИТЫ

- 6 Поверхность Ферми и псевдощель в манганитах

- 7 О природе металлического состояния алмаза, легированного бором

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

- 7 Яркое свечение нанотрубок

- 8 Вакуумный СВЧ диод с полевым УНТ катодом

*Не успокоенности, но мира,
уважения человеческого
достоинства, «культуры в
повседневности» желает
ПерсТ своим читателям в
грядущем Году! И тогда ...*

**«С праздником,
господа россияне!»**

*Поздравления ПерсТа
профессорам М.Ю.Куприянову
и О.В.Снигиреву в связи с
присуждением Ломоносовской
премии I степени Московского
государственного
университета за цикл работ в
области «слабой»
сверхпроводимости.*

широко используемом для выращивания слоев микрокристаллического и аморфного кремния, и осаждали на охлаждаемые жидким азотом стенки кварцевого реактора. В дальнейшем они могли быть диспергированы в растворителях и перенесены на другие подложки. Полученные таким образом образцы обладали интенсивной фотолюминесценцией, положение максимума которой сдвигалось в коротковолновую область спектра при уменьшении размеров нанокристаллов (в полном соответствии с квантовым размерным эффектом). К сожалению, в работе [1] не сообщается о квантовой эффективности свечения, равно как и о возможности возбуждать его электрическим током. Но показанные фотографии люминесцирующих образцов (см. рис. 1), а также заявленная производительность установки для получения нанокристаллов впечатляют.

Не остались забытыми и кремниевые квантовые нити. Группа из Китая (Nanjing Univ. и City Univ. Hong Kong) сообщает о получении люминесцирующих нитей с диаметрами от 5 до 15 нм. Нити, выращенные при высокой температуре на подложке *c-Si* из паров *Si* в присутствии катализатора (*Fe*), проявляли все присущие кремниевым наноструктурам свойства, а именно, зависимость от размеров фотолюминесценцию и рамановское рассеяние света. Картины просвечивающей электронной микроскопии свидетельствуют о кристаллической структуре нитей. Но опять нет данных по эффективности фотолюминесценции и возможности реализации электролюминесцентного режима свечения.

Другое направление в создании кремниевых светоизлучающих устройств - использование примесей-активаторов люминесценции (в России активен в этом направлении ИФМ РАН). Здесь пока предпочтение отдается ионам редкоземельных элементов (*Er*, *Eu*, *Yb*, *Tb*). Причем, используют введение редких земель как в структуры с кремниевыми нанокристаллами (подробности в обзоре [3]), так и в эпитаксиальные структуры с примесью *Ge*. В последнем случае при интенсивной накачке возникает интенсивная фотолюминесценция и даже инверсия населенности состояний ионов. Учитывая, что в таких структурах также возможна электролюминесценция, открывается заманчивая перспектива создания совместимого с кремниевой технологией лазера на 1.5 мкм [4]. Правда, пока все наблюдали только при оптической накачке и при низкой температуре ~10К. К сожалению, при повышении температуры до комнатной люминесценция *Er* в объемных или квазиобъемных фазах *c-Si*, равно как и в *SiGe*, претерпевает сильное гашение.

Проблему температурного гашения люминесценции редких земель удастся решить, используя в качестве матрицы тонкие (до 1 мкм) слои оксида кремния [3]. В таких структурах (см. рис. 2), легированных *Tb*, в Forschungszentrum Rossendorf удалось достичь электролюминесценции в зеленой области спектра с кванто-

вой эффективностью 15% и светимостью до 2 лм/Вт [4]. Возбуждение редкоземельных ионов при этом происходит при ударной ионизации горячими электронами, инжектированными из кремниевой подложки, а вывод свечения происходит через прозрачный проводящий электрод из оксида индия-олова (*ITO*). В аналогичных структурах, легированных *Gd*, была достигнута квантовая эффективность электролюминесценции 1% на длине волны 316 нм [5], т.е. даже в УФ диапазоне! Заметим, что еще в 2003 г. сотрудники компании ST Microelectronics сообщали об электролюминесценции с эффективностью 10% на 1.5 мкм в похожих структурах, но с примесью *Er* (см. обзор [3]). На настоящий момент отсутствует информация о дальнейшем развитии данных исследований в ST Microelectronics, и можно лишь догадываться о существующих проблемах, конкурентоспособности и моменте появления подобных светоизлучающих устройств на рынке.

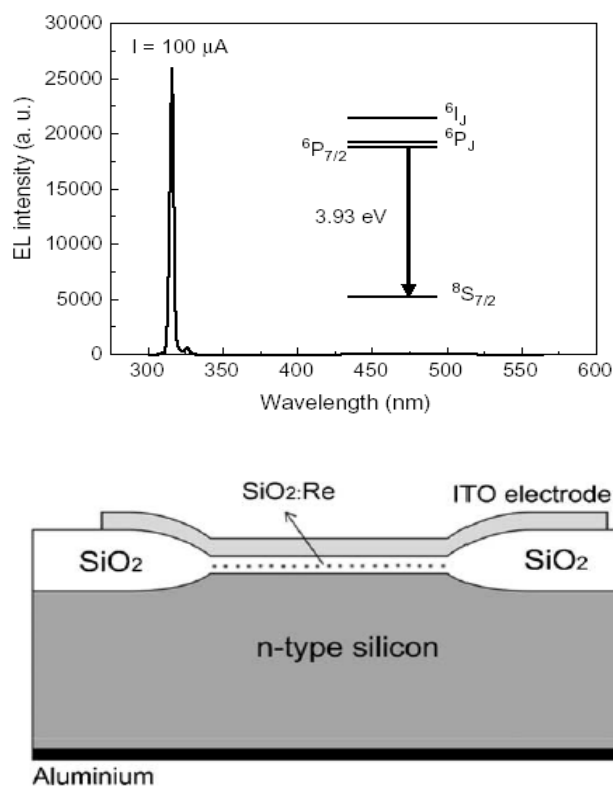


Рис. 2. Схема и спектр электролюминесценции MOS светодиода, легированного *Gd* при токе 100 мА.

И вот, пока основные усилия исследователей концентрировались на «нанокристаллическом» и «редкоземельном» направлениях борьбы за свечение кремния, произошел «прорыв» в несколько неожиданном месте. Прежде всего, сразу несколькими группам удалось преодолеть термическое гашение краевой люминесценции *c-Si*, что было достигнуто формированием в активной области дислокационных петель с размерами 10-100 нм (см. рис. 3, 4) [6], которые ограничивали диффузию и, таким образом, безызлучательную рекомбинацию носителей заряда.

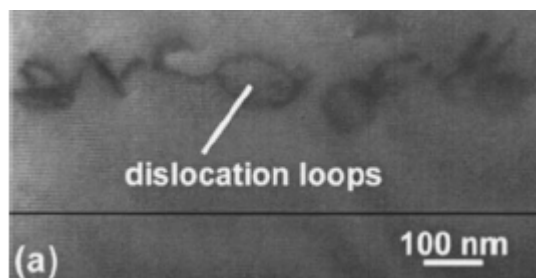


Рис. 3. Изображение в светлом поле просвечивающего электронного микроскопа вблизи [110] Si образца с петлями дислокаций, образованными при ионной имплантации бора.

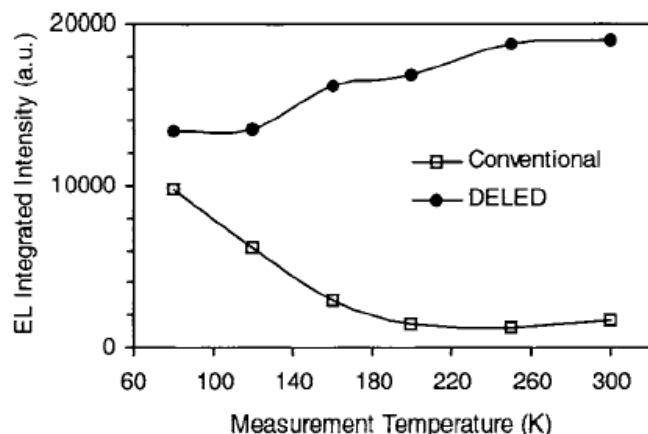


Рис. 4. Температурная зависимость интегральной интенсивности электролюминесценции для обычного светодиода и светодиода с дислокационными петлями. Прибор работал при прямом смещении при постоянной плотности тока 3 A/cm^2 .

Дислокационные петли образовывались в результате имплантации бора и последующего отжига. Были получены кремниевые светодиодные структуры, излучающие на длине волны $1.15 \mu\text{m}$ с квантовыми эффективностями 0.1% [5] и 0.02% [6] при комнатной температуре. Отметим, что еще раньше в работах [7] было зафиксировано улучшение излучательных свойств кремниевых светодиодов при комнатных температурах при введении (с помощью пластической деформации) дислокаций, а именно сообщалось о квантовой эффективности 0.1% свечения на длине волны около $1.5 \mu\text{m}$ (энергия фотонов 0.8 eV , что соответствует положению уровней энергии дислокационных состояний). Достигнутые величины пока ниже, чем рекордный 1% (M.A.Green et al., 2001 г.), полученный на сверхчистом *c-Si* со специально текстурированной поверхностью. Несмотря на это, авторы работ [5-7] полны оптимизма, поскольку они использовали достаточно стандартные *p-n*-переходы без оптимизации вывода излучения из структуры. При этом ожидается, что, например, текстурирование поверхности позволит увеличить выход электролюминесценции в несколько раз.

Электролюминесценция – это замечательно, но хочется большего, а именно, кремниевого лазера. ПерсТ уже писал о рамановском лазере в волноводных структурах на основе *c-Si* [8]. Подобный лазер,

работающий только при криогенных температурах, представляет, по существу, реализацию хорошо известного нелинейно-оптического явления вынужденного комбинационного рассеяния света. Он не может по определению быть накачиваем электрическим током, в нем нет инверсии уровней энергии электронов или каких-либо активных центров, отсутствует также резонатор.

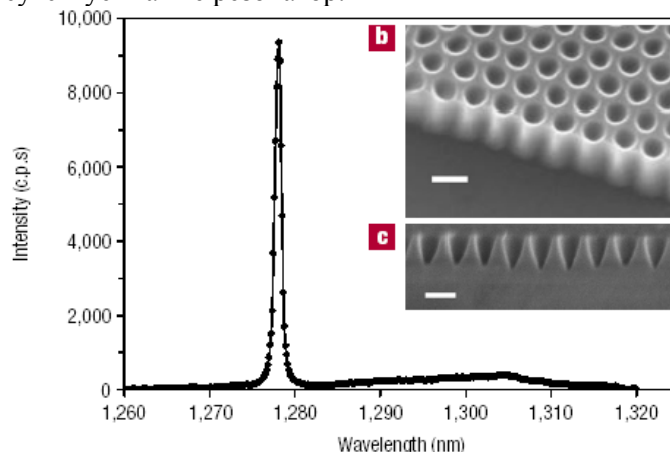


Рис. 5. Эмиссионный спектр а) от «паттернированного» SOI образца при 10 К. Изображение образца в СЭМ под углом 45° (b) и вид поперечного сечения (c). Масштабная линейка 100 nm .

Но вот появилось сообщение сотрудников Brown Univ. (США) об оптическом усилении и лазерной генерации в *c-Si* на длине волны 1278 nm [9]. По-видимому, оба явления обусловлены вынужденными оптическими переходами в среде с инверсией населенности уровней энергии. Авторы использовали тонкие $\sim 100 \text{ nm}$ слои *c-Si*, полученные по технологии SOI (*Si-on-Isolator*) с последующим наноструктурированием через маску пористого оксида алюминия. В результате была сформирована упорядоченная решетка конических отверстий с периодом также $\sim 100 \text{ nm}$ (см. рис. 5). Возбуждение проводили светом аргонового лазера на длине волны 514.5 nm с интенсивностью $10\text{-}100 \text{ Вт/см}^2$. Для образцов с длиной активной области около 1 mm при $T=10 \text{ K}$ достигали оптическое усиление $\sim 260 \text{ см}^{-1}$ при накачке 65 Вт/см^2 . Лазерное излучение выходило с торца слоя и имело достаточно узкую диаграмму направленности (см. рис. 5, 6). В работе [9] приведены также другие аргументы в пользу лазерной природы наблюдаемого излучения, а именно, сужение формы линии при превышении порога, наличие продольных мод в спектре свечения. Все это, действительно, убеждает в том, что вождельный кремниевый лазер наконец-то появился. Пока его параметры достаточно скромные, так внешняя квантовая эффективность всего $10^{-6}\text{-}10^{-5}$ и выходная мощность не более 30 нВт при $T=10 \text{ K}$. В то же время существуют и проблемы. Во-первых, оптическое усиление и лазерную генерацию наблюдали при температурах не выше 70 K , и не понятно, удастся ли повысить рабочие температуры. Кроме того, как признаются сами авторы работы [9], до конца не

известна природа свечения на длине волны 1278нм. Предполагают, что оно вызвано рекомбинацией неравновесных электронов и дырок на уровнях так называемых А-центров, которые обычно отождествляются с дефектами типа вакансий кремния. Наличие высокой концентрации последних в исследованных структурах, по мнению авторов [9], обусловлено введенными нанотверстями (antidots).

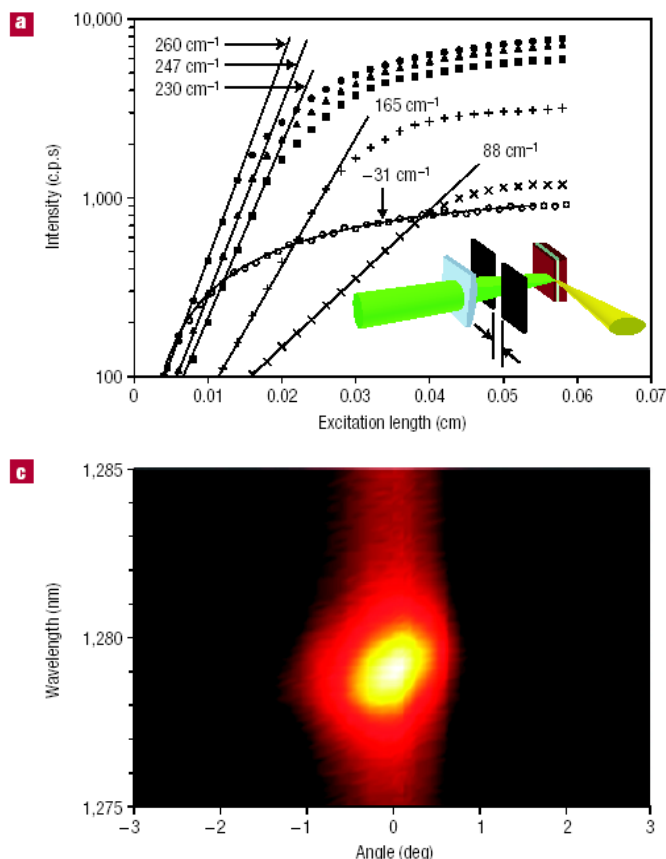


Рис. 6. Оптическое усиление при 1278нм. *a* - Оценка интенсивности эмиссии в зависимости от длины волны оптической накачки для плотности мощности накачки 65 Вт/см² при 10, 25, 40, 55 и 70 К с соответствующими коэффициентами усиления 260, 247, 230, 165 и 88±5см⁻¹. *c* - Распределение горизонтальной интенсивности по длине волны при 10К.

Таким образом, полученные за последний год результаты убеждают, что кремниевые излучатели, усилители и лазеры все больше становятся реальными экспериментальными устройствами. Смогут ли они выйти на рынок и конкурировать с уже существующими приборами на основе традиционных лазерных материалов, таких как диэлектрики или полупроводники, покажет время.

В.Тимошенко

1. L. Mangolini et al. *Nano Letters* 2005, **5**, 655
2. Z. Y. Zhang et al. *J. NonCryst.Solids* 2005, **285**, 620
3. A. J. Kenyon. *Semicond. Sci.&Technol.* 2005, **20**, R65
4. *ПерсТ* 2005, **12**, вып. 11 - http://perst.issp.ras.ru/Control/Inform/perst/5_11/index.htm
5. M. Helm et al. *Microelectronics Journal* 2005, **36**, 957

6. M.Lourenço et al. *Appl. Phys. Lett.* 2005, **87**, 201105
7. V. Kveder et al. *Appl. Phys. Lett.* 2004, **84**, 2106; *Phys. stat. solidi (a)* 2005, **202**, 901
8. H. Rong et.al., *Nature* 2005, **433**, 292
9. S. G. Cloutier et al. *Nature Materials* 2005, **4**, 887

СНОВА К ОСНОВАМ

Выключатель скорости света

Из классических курсов оптики известно, что групповая скорость света в некоторых средах вблизи резонансного поглощения может быть заметно меньше его скорости в вакууме. Россия стоит у самых истоков исследования этого явления. В вышедших из моды отечественных учебниках физики упоминаются т.н. «крюки Рождественского», обнаруженные еще в начале прошлого века, дающие наглядное и запоминающееся представление об этом явлении. Подзабытые классические представления превратились в сенсацию, когда была опубликована статья по «остановке света» [1] в парах рубидия. Попав в список лучших работ по физике 2001 года, работа [1] вызвала лавину работ, в которых свет затормаживался или ускорялся. Отметим, что, несмотря на широкое признание, сама работа [1], которая дала старт целому направлению, подверглась достаточно квалифицированной критике [2]. ПерсТ отслеживал эту тематику, и дополнительные ссылки можно найти в [3].

Длительное время эксперименты по «остановке света» оставались вотчиной оптических лабораторий, оснащенных перестраиваемыми лазерами и обладающих опытом работы по т.н. «оптической накачке», как правило, в разреженных газах. Микроминиатюризацию, необходимую для практических применений, на этом пути представить было невозможно. В то же время отсутствие возможности остановить световой сигнал оставалось одним из ключевых препятствий на пути реализации оптических компьютеров. При всех своих преимуществах перед электрическим током свет не мог храниться в регистрах или ждать, пока освободится информационная шина. Это означало, что оптический компьютер нельзя было развивать, как эволюцию уже существующих ЭВМ. Создавать же оптический компьютер от нуля, с изменением основополагающей идеологии, по-видимому, не брались даже бесшабашные оптимисты.

Однако статья, опубликованная в ноябрьском *Nature* [4], возможно, знаменует преодоление тупика. Сотрудники IBM T.J. Watson Research Center (США) реализовали электрическое управление скоростью света в микроминиатюрном устройстве на кремниевой микросхеме. Несколько фотографий ключевых частей этого устройства приведены на рис. 1. Само устройство представляет собой интерферометр Маха-Цендера. Выбор интерферометрической схемы регистрации авторы аргументируют тем, что при

ПерсТ, 2005, том 12, выпуск 24

обычных экспериментах с измерением времени прохождения светового импульса та самая сильная аномальная дисперсия, которая необходима для эффекта изменения групповой скорости, одновременно приводит к изменению формы импульса. В свою очередь, изменение формы импульса приводит к неопределенности при фиксации момента прохождения импульса, что оказывается сравнимым по величине с исследуемым эффектом. Интерференционная схема, в которой непосредственно регистрируется задержка одного луча относительно другого, в значительной степени лишена этого недостатка. В обсуждаемом устройстве пластиковые волноводы, разделяющие свет по плечам интерферометра, сопряжены с отрезками фотонных кристаллов, которые составляют часть пути света в каждом разделенном плече. В свою очередь, фотонные кристаллы реализованы как «решето» из отверстий в тонкой, 223-нанометровой кремниевой пластине. Система отверстий, как видно из приведенной иллюстрации, образовывала треугольную решетку с периодом 437 нм, радиусы отверстий составляли четверть периода. Преимущество фотонных кристаллов перед другими средами заключалось в сильной хроматической дисперсии в используемой спектральной области вблизи края фотонной зоны. Авторы указывают, что эта величина в 10^7 превышала хроматическую дисперсию обычных волноводных систем связи.

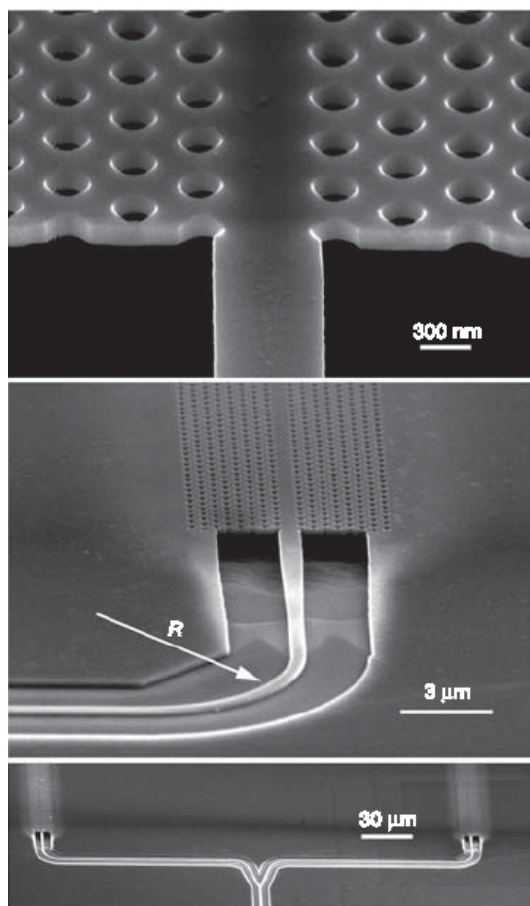


Рис. 1. СЭМ изображение пассивного несбалансированного интерферометра Маха-Цендера с волноводом на фотонных кристаллах.

Перст, 2005, том 12, выпуск 24

Столь сложная система настраивает на, как минимум, адекватно сложные эксперименты. Однако в решающей фазе эксперимента авторы обошлись без излишних сложностей. Подведя соответствующим образом электрические контакты, авторы смогли по своему усмотрению нагревать одно или другое плечо интерферометра и, варьируя тем самым параметры материала в одном из плеч, менять, в том числе, и скорость прохождения света в конкретном плече интерферометра. Достигнутое изменение скорости света легко регистрировалось интерферометром по изменению интенсивности прошедшего через него света. Работа названа авторами «Активный контроль скорости света в микросхеме с фотонным кристаллом» - что есть абсолютная правда; в тексте статьи упоминается еще и «...электрическое управление...» вышеупомянутой скоростью.

В итоге: опубликованное «активное электрическое управление скоростью света» по причинам, упомянутым выше, безусловно, долгожданный результат. За то время, пока оптический компьютер числился в "листе ожидаемых" перспективных систем, традиционная электроника достигла таких параметров, которые и не снились во времена зарождения идеи оптического компьютера, и процесс освоения новых технологий и идей продолжается. И, хотя и маловероятно, что электронная вычислительная техника позволит оптическим ЭВМ себя догнать, новый результат, скорее всего, будет востребован - научные результаты, как и рукописи, не горят.

М.Компан

1. *Phys. Rev. Lett.* 2001, **86**, 783
2. *УФН* 2004, **174**, 1105
3. *Перст* 2001, **8**, вып. 1/2,
http://perst.issp.ras.ru/Control/Inform/perst/2001/1_01_2/index.htm ; 2004, **11**, вып. 24
http://perst.issp.ras.ru/Control/Inform/perst/2004/4_24/index.htm
4. *Yurii A. Vlasov et al. Nature* 2005, **438**, 65

НАНОСТРУКТУРЫ

Катодолюминесценция и наноструктуры

В работе швейцарских ученых (Inst. Quantum Electronics and Photonics, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne) [1] предложена новая методика исследования пикосекундной динамики носителей заряда в наноструктурах, которая основана на эффекте катодолюминесценции и позволяет улучшить пространственное разрешение до ~ 50 нм. Эта методика апробирована на пирамидальных квантовых точках *InGaAs/AlGaAs* с поперечными размерами около 30 нм. Детальная информация о поведении электронов в наноструктурах очень важна при разработке и оптимизации электронных компонент квантовых компьютеров, квантовых оптических устройств, однофотонных источников для квантовой криптографии.

1. *Nature* 2005, **438**, 479

Терагерцы текут каскадами

Сотрудники Vienna Univ. Technology (Австрия) изготовили и исследовали терагерцовый каскадный лазер, излучающий волны в диапазоне частот 3.0 - 3.8 ТГц. Гетероструктура $GaAs/Al_{0.15}Ga_{0.85}As$ помещена в кольцевой микрорезонатор на «шепчущей» моде, которая распространяется вдоль стенки, как в галерее. Частота этой моды подстроена в резонанс с частотой перехода электрона между уровнями энергии в квантовой яме. Для лазерной генерации необходима инверсная заселенность. Чтобы ее добиться, надо электроны быстро уводить с нижнего уровня.

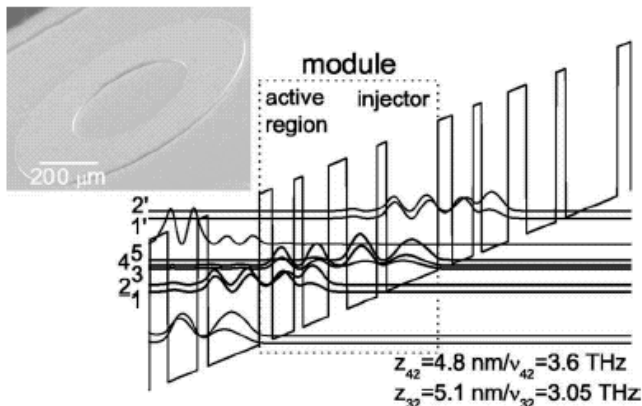


Рис. Зонная диаграмма структуры с 4-мя квантовыми ямами. Показаны волновые функции электронов, полученные численным решением одномерного уравнения Шредингера. На вставке представлено SEM изображение кольцевого резонатора.

Раньше для достижения этой цели предлагали тоже переход в режиме лазерного излучения, и тогда ПерсТ сообщал о терагерцах как побочном продукте каскадных лазеров. Теперь идея состоит совсем в другом. Вместо излучения фотонов, предлагают использовать испускание оптических фононов. До сих пор с этим очень сильным процессом в каскадных лазерах только боролись. Вся т.н. «инженерия квантовых ям» была нацелена прежде всего на уменьшение матричных элементов этого безызлучательного перехода, ведь из-за него электрон, пройдя 40 каскадов типичного каскадного лазера, испускал только один фотон, а остальное все были оптические фононы. Теперь бывший враг стал союзником. Переход с испусканием оптического фонона позволяет быстро очищать нижний уровень и поддерживать лазерный режим терагерцовой генерации.

В.Вьюрков

1. Appl.Phys.Lett. 2005, 87, 211112

СВЕРХПРОВОДНИКИ И МАНГАНИТЫ

Поверхность Ферми и псевдощель в манганитах

Некоторые сложные оксиды марганца (манганиты) демонстрируют колоссальное магнитосопротивление: магнитное поле приводит к резкому уменьшению электрического сопротивления. Этот эффект имеет место при температурах, близких к температуре T_C перехода из парамагнитной в ферромагнит-

ную фазу. Он возникает из-за того, что при $T < T_C$ основное состояние манганитов является металлическим (и ферромагнитным), а при $T > T_C$ — диэлектрическим (и парамагнитным). Природа металлического ферромагнитного состояния манганитов является предметом жарких дебатов. С одной стороны, теоретические расчеты, выполненные методом функционала плотности, свидетельствуют о сходстве электронной зонной структуры (и в том числе поверхности Ферми) манганитов и купратных ВТСП. С другой стороны, фотоэмиссия с угловым разрешением (ARPES) не обнаруживает в манганитах квазичастичного пика. Спектральный вес на уровне Ферми сильно подавлен, что отвечает так называемой псевдощели. При этом экспериментальная величина эффективной массы электрона не больше (вопреки ожиданиям, основанным на сильном электрон-решеточном взаимодействии), а в два раза меньше теоретической «зонной» массы. Кроме того, электрическая проводимость, рассчитанная на основании данных ARPES, почти на порядок величины больше, чем дают непосредственные транспортные измерения.

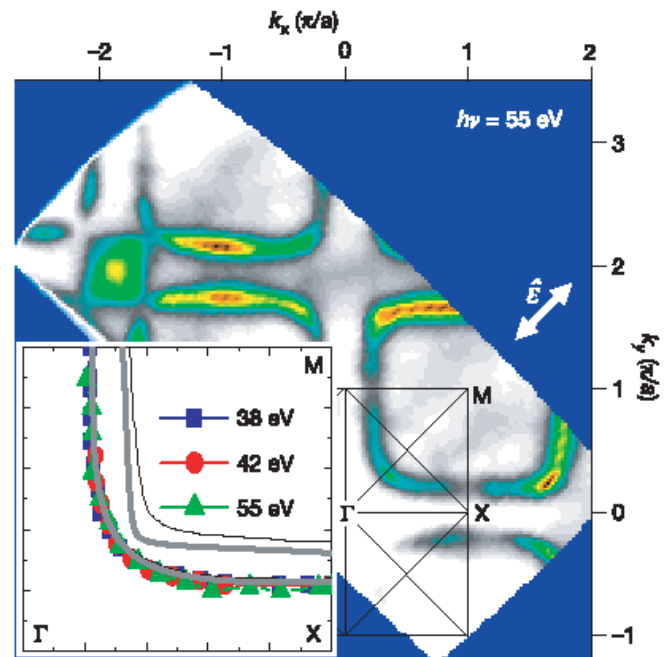


Рис. Топология поверхности Ферми в $La_{1.2}Sr_{1.8}Mn_2O_7$ по данным ARPES

Свет на электронные свойства манганитов проливают исследования слоистого соединения $La_{1.2}Sr_{1.8}Mn_2O_7$, выполненные большим коллективом американских (Stanford Univ., Lawrence Berkeley Nat. Lab., Argonne Nat. Lab.), канадских (Univ. Waterloo), голландских (Leiden Univ.) и японских (Univ. Tokyo и AIST) физиков [1]. При $T = 20K \ll T_C \approx 120K$ был обнаружен небольшой, но четко определенный квазичастичный пик вблизи направления $(0,0)-(\pi,\pi)$ в зоне Бриллюэна. В направлении $(0,0)-(\pi,0)$ такой пик отсутствует. На поверхности Ферми имеются почти параллельные участки (нестинг), как и в ВТСП, см. рисунок. По мере удаления от направления $(0,0)-$

(π, π) интенсивность квазичастичного пика быстро уменьшается. При этом спектры *ARPES* приобретают такой же вид, как в псевдощелевом состоянии недодопированных ВТСП или в поляронном состоянии диэлектрика La_2CuO_4 . Уровень Ферми находится в зоне, образованной e_g состояниями атомов Mn . Ее ширина составляет ≈ 1.8 эВ, что на ≈ 0.4 эВ больше, чем дает приближение локальной плотности (*LDA*). Эффективная масса m^* , определенная по дисперсии квазичастиц, примерно в 5.6 раз превышает теоретическую величину m_{LDA} и в 3.3 раза – массу свободного электрона. Это говорит об очень сильном электрон-фононном взаимодействии с константой $\lambda = (m^*/m_{LDA} - 1) \approx 4.6$ – настолько сильным, что, согласно канонической теории, оно может даже индуцировать структурную неустойчивость.

Сходство электронного строения таких различных по своим свойствам материалов как манганиты и ВТСП свидетельствует против сверхпроводящей природы псевдощелевого состояния. По-видимому, псевдощель является общим атрибутом оксидов переходных металлов, а не отличительной особенностью одних лишь ВТСП. С другой стороны, не вызывает сомнений ключевая роль электрон-фононного взаимодействия и “решеточных поляронов” в манганитах. В ВТСП можно говорить об “антиферромагнитных поляронах”. Может быть, именно они приводят к высокотемпературной сверхпроводимости?

1. N.Mannella et al., *Nature* 2005, **438**, 474

О природе металлического состояния алмаза, легированного бором

Электронные свойства слабо легированных полупроводников хорошо описываются с помощью расчетов зонной структуры при учете примесных энергетических уровней. Если концентрация примесей (доноров или акцепторов) n превышает критическую величину n_c , то происходит переход диэлектрик-металл. Принято считать, что это связано с формированием примесных зон из примесных уровней. Однако в литературе пока отсутствуют результаты детальных исследований электронной структуры полупроводников с $n > n_c$. Поэтому наблюдение сверхпроводящего перехода в сильно легированном бором алмазе [1] вызвало бурную дискуссию о природе металлического состояния, ответственного за сверхпроводимость. Конкурируют два подхода, различающиеся в вопросе о том, где расположены подвижные носители тока: в примесных или в “собственных” зонах. В работе [2] экспериментально показано, что справедлив второй из этих сценариев. Авторы [2] из Japan Synchrotron Radiation Res. Inst./Spring-8, Okayama Univ., Nat. Inst. Materials Sci., Waseda Univ., Hiroshima Univ., используя методику фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением (*ARPES*), определили положение уровня Ферми и дисперсию (зависимость энергии от импульса) электронов вблизи уровня Ферми. Было установлено, что при сильном легиро-

вании дырки располагаются вблизи потолка валентной зоны, которая имеет ширину около 22 эВ и отделена диэлектрической щелью $E_g = 5.5$ эВ от зоны проводимости. Если в ВТСП экспериментальная величина разрешенной зоны, в которой находится уровень Ферми, меньше теоретической (что приписывается электрон-электронным корреляциям), то в алмаз/боре – наоборот, несколько больше. Это говорит о второстепенной роли межэлектронных взаимодействий и применимости обычного ферми-жидкостного подхода к описанию электронной структуры.

Л.Опенев

1. E.A.Ekimov et al., *Nature* 2004, **428**, 542

2. T.Yokoya et al., *Nature* 2005, **438**, 647

ФУЛЛЕРЕНА И НАНОТРУБКИ

Яркое свечение нанотрубок

Углеродные нанотрубки являются прямозонными полупроводниками. Это означает, что в них может происходить непосредственная аннигиляция электрон-дырочных пар, приводящая к испусканию фотона. Прямозонность автоматически включает нанотрубки в число материалов оптоэлектроники. Для сравнения, непрямозонный кремний только в последнее время попал в число избранных, но только в наноструктурном виде. Имеется в виду пористый кремний, а также вкрапления нанокристаллов кремния в оксиды кремния. В объемном кристаллическом кремнии излучательная рекомбинация возможна только из связанных состояний, каковыми являются экситоны или локализованные центры. Из-за малой энергии связи и довольно сильного взаимодействия с фононами экситоны быстрее разваливаются, чем рекомбинируют. В результате свечение очень слабое.

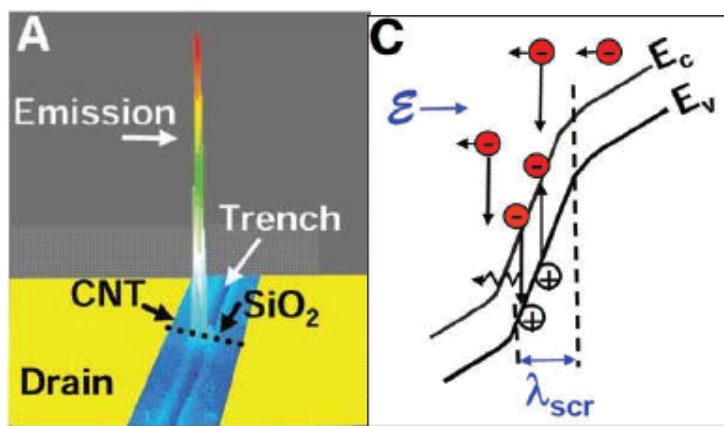


Рис. 1. – вид (А) и зонная диаграмма (С) структуры.

Исследователи из IBM T.J.Watson Research Center (США) показали, что в ярком свечении углеродных нанотрубок основную роль все-таки играют экситоны, а не прямые переходы. Однако для этого нанотрубку надо подвесить! Одномерность нанотрубок значительно усиливает кулоновское взаимодействие, а значит и увеличивает энергию связи экситона. Кроме того, матричный элемент перехода с образованием экситона тоже возрастает. Подвешенное состояние нанотрубки обеспечивает взаи-

модействие только с одномерными фононами, которое является слабым. В участках, лежащих на контактах присутствует сильное взаимодействие с объемными фононами. На рис. 1с показана зонная диаграмма структуры. Поле в зазоре настолько велико, что инжектируемые электроны (униполярная инжекция) рожают электрон-дырочные пары. Эти пары быстро образуют экситоны, которые аннигилируют с испусканием фотонов. Так одномерность заставляет нанотрубки ярко светить.

В.Вьюков

1. *Science* 2005, **310**, 1171

Вакуумный СВЧ диод с полевым УНТ катодом

Для применений полевых эмиссионных катодов на основе углеродных нанотрубок (УНТ) необходимо обеспечить высокую плотность тока эмиссии. Рекорд на сегодня принадлежит сотрудникам инженерного факультета Кембриджского университета (Англия). В работе [1] они описали микроволновый диод на катоде из УНТ, работающий при высокой частоте (1.5ГГц). Благодаря малому весу, малоинерционности и отсутствию нагрева прибор перспективен в телекоммуникационных системах. В резонатор введены линейки из вертикально ориентированных УНТ (см. рис.). Расстояния между соседними УНТ в линейках примерно равны удвоенной высоте, что соответствует минимальному влиянию эффекта экранирования на плотность тока эмиссии. Каждый из 16 катодов имеет активную площадь $0.5 \times 0.5 \text{ мм}^2$ и содержит около 2500 индивидуальных УНТ. Поскольку стенки резонатора и эмиттеры заземлены, высокочастотное электрическое поле существует только внутри резонатора, как показано на эквивалентной схеме (рис. 1с). Устройство работало при катодном токе 1мА в течение 40 часов, не проявляя признаков деградации. При напряженности переменного электрического поля 29МВ/м анодный ток достигал величины 3.2мА, что соответствует плотности тока 1.3 А/см^2 , пиковому значению тока 30мА и пиковому значению плотности тока 12 А/см^2 (см. рис. 1 d).

В современных микроволновых приборах используют термоионные источники электронов, которые работают либо при постоянных, либо низкочастотных токах, и в которых высокочастотная модуляция электронного пучка производится на выходе из ис-

точника. Это обуславливает значительные габариты устройств. В новом устройстве межэлектродный промежуток в УНТ катодах составляет несколько сот микрон, благодаря чему прибор имеет небольшую электрическую емкость, и, как следствие, малую инерционность, позволяющую работать при частотах мега- и гигагерцового диапазона. Следует также отметить высокую химическую стабильность катодов, которые, в отличие от металлических, меньше подвержены термическому разрушению.

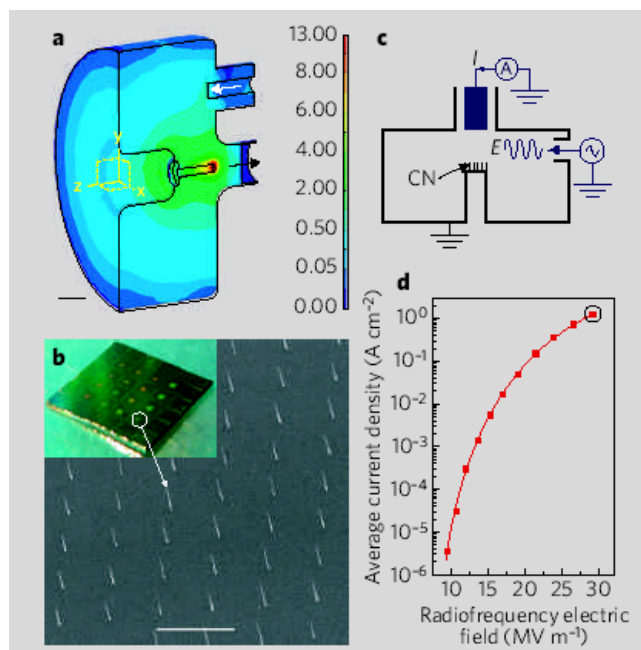


Рис. 1. *a* - Поперечное сечение резонатора, используемого для генерации высокочастотного электромагнитного поля. На вертикальной шкале цвет указывает величины приложенного электрического поля (кВ/м). *b* - Микроизображение катода с эмиттерами из УНТ. Нанотрубки диаметром 49нм и высотой 3.5мкм расположены на расстоянии 10мкм друг от друга. Размер масштабной линейки 15мкм. На вставке представлена фотография 16 катодов. *c*) Эквивалентная электрическая цепь (CN – линейка из углеродных нанотрубок) *d* - Зависимость плотности тока от напряженности высокочастотного электрического поля, полученная при частоте 1.5ГГц. Кружком отмечена точка, соответствующая максимальному току (3.2 мА)

А.Елецкий

1. *Nature* 2005, **437**, 968

Экспресс-бюллетень ПерсТ издается совместной информационной группой
ИФТТ РАН и РНЦ «Курчатовский институт» при поддержке
Программы Президиума РАН «Информатизация»

Редактор: С.Корецкая тел: (095) 930 3389, e-mail: stk@issp.ras.ru

Научный консультант: К.Кугель e-mail: kugel@orc.ru

В подготовке выпуска принимали участие: В.Вьюков, А. Елецкий, М.Компан,

Ю.Метлин, Л.Опенков, В.Тимошенко

Компьютерный ввод, макет: И.Фурлетова

Ответственный за тираж: Ю.Мухин

Адрес редакции: 119296 Москва, Ленинский проспект, 64^а