

Сибирский нанофорум

В Новосибирском академгородке 25—29 июня 2007 г. состоялся 15-й ежегодный Международный симпозиум по наноструктурам, приуроченный к празднованию 50-летия Сибирского отделения Российской академии наук

Развитие современных полупроводниковых нанотехнологий в России сегодня зависит от активного взаимодействия ученых нашей страны и от их сотрудничества с зарубежными коллегами. Первый Международный симпозиум по полупроводниковым наноструктурам был организован в 1993 г. Нобелевским лауреатом академиком Ж. И. Алферовым на базе Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе в Санкт-Петербурге. С тех пор каждый год в конце июня специалисты ведущих профильных институтов Центральной России, Сибири и Дальнего Востока собираются для обсуждения современных тенденций в нанотехнологиях и нанофизике, делятся друг с другом последними научными новостями и перенимают опыт коллег из ведущих научных школ Европы, США и Японии.

В этом году симпозиум было решено провести в Новосибирске, на базе Института физики полупроводников Сибирского отделения РАН, что, по мнению его директора, академика РАН А. Л. Асева, позволило всем участникам познакомиться и с ведущим институтом Сибири в области полупроводниковых нанотехнологий, и с красотами сибирского края. В симпозиуме приняли участие более 200 ученых со всего мира. Особенно радовало глаз большое число молодых участников.

Главной темой форума стали новейшие достижения в физике наноструктур, нанотехнологиях, а также перспективы практического использования этих достижений.

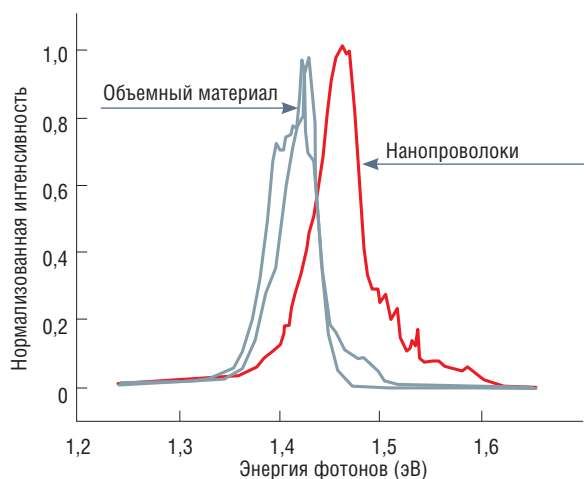
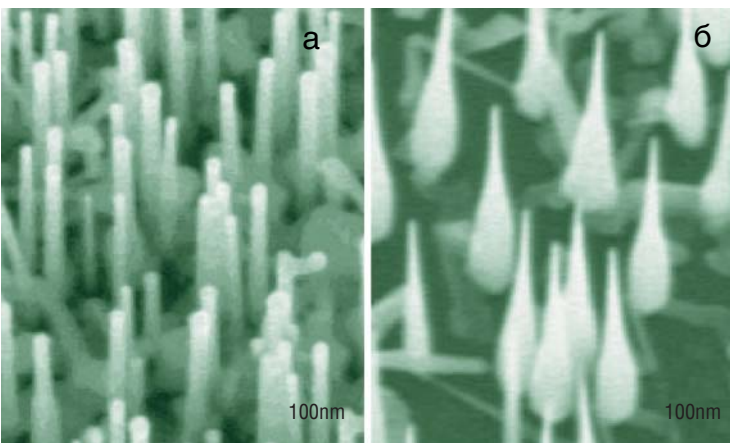
«Усатые» светлячки

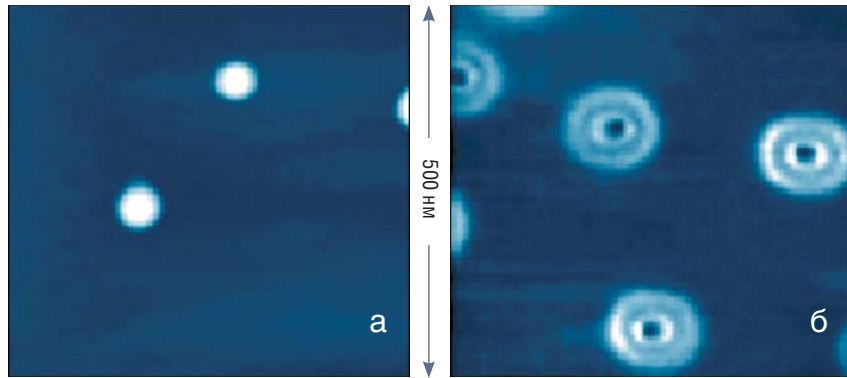
Подробно рассказать обо всех научных направлениях, упоминаемых в выступлениях участников симпозиума, невозможно. Остановимся на некоторых из них — самых запомнившихся.

Так, конференция открылась докладом проф. Ченг-Хаснайн из Университета Калифорнии (Беркли), который был посвящен достижениям в технологии изготовления лазерных диодов на основе светоизлучающих нанопроволок из арсенида галлия (GaAs) и фосфида индия (InP), выращенных на подложке из кремния (Si). Рост нанопроволок, как отмечалось докладчиком, инициируется напылением в вакууме небольшого количества золота (Au), которое при повышении температуры до 450 °С образует жидкие наноклапты Au-Si эвтектики, так что рост «усов» (нанопроволок) осуществляется под каплями эвтектики вверх от подложки. Варьируя соотношение потоков исходных элементов, можно изменять не только их диаметр, но и, что самое удивительно, их форму — от цилиндрической до ко нусовидной.

Изображения нанопроволок из фосфида индия (InP), выращенных при соотношениях потоков In и P: 67 (а) и 240 (б). Сканирующий электронный микроскоп

Голубой сдвиг полосы люминесценции нанопроволок из InP относительно пика для объемного материала





Новый способ «капельной эпитаксии» — метода получения кольцевых структур нанометрового размера (в данном случае — из арсенида галлия GaAs). Сначала на подложке галлий собирается в маленькие капли (а), а потом на поверхность направляется поток атомов мышьяка. В результате каждая капелька трансформируется в двойное кольцо (б).
Сканирующий электронный микроскоп

Каждая такая нанопроволочка является светоизлучающим элементом. Но поскольку диаметры проволок очень малы (десятки нанометров), их электронно-оптические свойства, в силу квантовых ограничений, становятся зависимыми от размеров и формы. Это проявляется в значительном «голубом» сдвиге полосы люминесценции, что означает изменение длины волны излучаемого света в сторону более коротких длин.

Возможности разрабатываемой технологии столь широки, что, оказывается, можно создавать внутри InP-нанопроволок единичные квантовые точки в виде тонких прослоек другого материала, например InAs, которые обладают не только узкой шириной излучения — 1 мэВ (миллиэлектронвольт), но приводят к свечению структур при комнатной температуре. Это открывает путь для практического применения подобных нанопроволок в качестве светоизлучающих элементов.

Кольца на память

Японский ученый Т. Мано рассказал о новом способе «капельной эпитаксии» — методе создания кольцевых структур нанометровых размеров, — представляющем собой один из вариантов идеи самоформирования, которая уже более 15-ти лет применяется для изготовления квантовых точек. Суть идеи состоит в том, что рост пленки одного полупроводникового материала на «инородной» подложке из другого материала может оказаться неустойчивым, и растущая пленка, начиная с некоторой толщины, разбивается на крошечные островки. Это и есть *квантовые точки* (QDs в английской терминологии). Такие точки предлагается использовать на практике как рабочие элементы полупроводниковых лазеров, флэш-памяти, и даже как элементарные «кирпичики» квантового компьютера.

Предложенный способ подходит для создания другого, не менее интересного, класса нанообъектов — квантовых колец. Речь идет о росте пленки арсенида галлия, когда в условиях сверхвысокого вакуума на растущую поверхность направляются потоки атомов галлия и молекул мышьяка. Изюминка метода такова:

в определенный момент поток мышьяка перекрывается, и избыточный галлий на поверхности собирается в капельки размером около 50 нм. Потом снова подается мышьяк, а приток галлия убирается. Поступающие атомы мышьяка «бегают» по поверхности, находят капельки галлия и вступают с ними в реакцию. В результате вокруг каждой капли образуется «ободок» из арсенида галлия, т. е. квантовое кольцо.

Варьируя условия роста, можно получить и двойные квантовые кольца, в которых за счет потоков атомов галлия и мышьяка навстречу друг другу формируется дополнительное, внешнее кольцо. Эти квантовые кольца, если поместить их в магнитное поле, могут демонстрировать эффекты интерференции электронных волн. Заметим, что аналогичные квантовые кольца (изготовленные, правда, по совсем другой технологии) изучаются и в нашем институте. В частности, у нас создан рекордно маленький кольцевой квантовый интерферометр.

Электронный бильярд в микроволновке

Француз С. Сассин (Гренобль), получивший премию как лучший молодой докладчик, рассказал об экспериментах с так называемым *электронным бильярдом*, на который действует микроволновое поле. Этот бильярд устроен следующим образом: в полупроводниковой структуре с двумерным электронным газом вытравлены *антиточки* — фрагменты в виде полукругов, выстроенных в правильную решетку. В результате электроны могут «бегать» между этими полукругами, зеркально отражаясь от них.

Оказывается, если на такую структуру направить микроволновое излучение, то в том направлении, куда «смотрят» полукруги, потечет постоянный ток. Сами авторы называют это явление «эффектом храповика», имея в виду, что главное здесь — нарушение симметрии. Точно так, как храповое колесо в часовом механизме может вращаться лишь в одну сторону, так и электроны в изучаемой системе могут двигаться только в опреде-

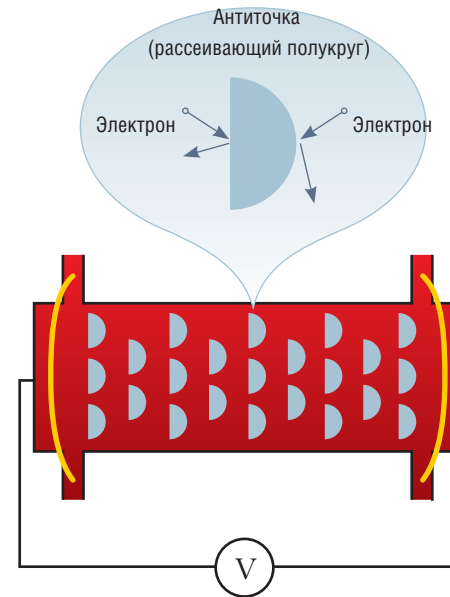


Схема «электронного бильярда». В решетке антиточек в форме полукруга под действием микроволнового поля возникает постоянный ток

ленном направлении, по-разному отражаясь от плоской и закругленной сторон антиточки. Микроволновое излучение в данном случае служит для «раскачивания» электронов, причем эффект зависит от поляризации волны. По мнению автора, подобное устройство можно применять как детектор поляризации.

Следует отметить, что данное научное направление — изучение электронных бильярдных структур с решетками антиточек — возникло и развивается во многом благодаря работам сотрудников ИФП СО РАН. Так, один из докладов, сделанный от ИФП А. Г. Погосовым, был посвящен загадочному поведению сопротивления бильярда в магнитном поле. Эта экспериментальная работа еще ждет своего теоретического обоснования.

Терагерцовый серфинг

Большой интерес среди участников симпозиума вызвал доклад молодой сотрудницы ИФП СО РАН Е. В. Наумовой, посвященный использованию микроспиралей для управления поляризацией терагерцовых волн (терагерц равен 1 012 герц, что соответствует длине волны порядка 100 микрон). Это совместная работа двух команд: ИФП, где создан и широко развивается метод очень точного, контролируемого создания трехмерных микро- и нанообъектов, и Института ядерной физики СО РАН, который обладает уникальным источником терагерцового излучения — лазером на свободных электронах.

Суть эксперимента в том, что через маленькие позолоченные спиральки (размерами в десятки микрон), уложенные ровным слоем на полупроводниковой подложке, пропускалось излучение с частотой в несколько терагерц. При этом измерялась *поляризация*, т. е. направление электрического поля, прошедшей волны. Для чего это нужно? Дело в том, что терагерцовый диапазон, который лежит на шкале электромагнитных волн между радиоволнами СВЧ и инфракрасным светом, технически освоен еще мало. Например, для световых волн есть способ контролируемого поворота плоскости поляризации с помощью жидких кристаллов: это как раз тот принцип, на котором работают жидкокристаллические мониторы, — а вот для терагерцовых волн ничего похожего пока не было предложено. Именно в этом направлении сотрудники ИФП сделали первый шаг: было показано, что слой микроспиралей способен поворачивать плоскость поляризации терагерцовых волн, в результате чего изменяется направление электрического поля.

Сама идея очевидна: давно известно, что свет изменяет свою поляризацию, проходя через среду, содержащую спирально закрученные молекулы, например через раствор сахара. Но для терагерцовой области молекулы-спиральки не годятся: они слишком малы. Поэтому нужны рукотворные спирали, сделанные с соблюдением жестких «технологических норм»: отклонения размеров и диаметра спиралей должны быть достаточно малы.

И здесь нельзя обойтись без технологии, созданной в ИФП в лаборатории В. Я. Принца*. В общих чертах эта технология такова: изготавливается двухслойная

* См.: НАУКА из первых рук. — 2007. — № 2 (14).

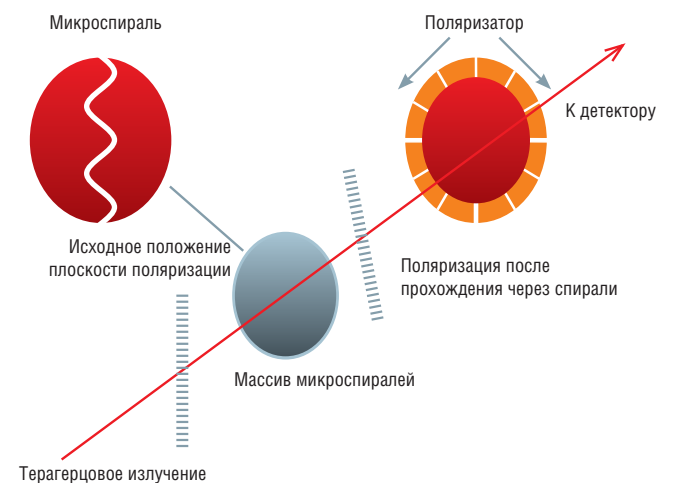


Схема измерения поворота плоскости поляризации терагерцового излучения лазера на свободных электронах



пленка, в которой присутствуют внутренние упругие напряжения, заставляющие ее изгибаться. Пока пленка, прикрепленная к подложке, еще не изогнулась, из нее «вырезаются» нужные «лоскутки»: например, для получения спиралей надо вырезать прямоугольники под углом к кристаллографическим осям. Затем, путем травления, пленка освобождается и сама сворачивается в требуемую конструкцию.

Вот таким образом и были получены нужные для эксперимента нанобъекты. В дальнейших планах исследователей — создание необычного вещества, многослойного (объемного) метаматериала с отрицательным показателем преломления терагерцового излучения, более того — способного динамически «переключаться» для сверхбыстрого управления поляризацией, амплитудой и направлением распространения волны.

Будущее «квантовых точек»

В блестящем докладе профессора Д. Бимберга (Берлин), открывшем заключительную пленарную сессию конференции, были представлены результаты исследований, проведенных в рамках широкой научной кооперации ученых Германии и России. В докладе речь шла о перспективах использования полупроводниковых наноструктур (квантовых точек QDs) при создании сверхбыстродействующих чипов памяти и надежных систем защиты компьютерных систем.

Такие приборы должны работать при комнатной температуре, что является весьма непростой задачей, поскольку квантовые эффекты, лежащие в основе наноэлектроники, с ростом температуры затухают. Главными требованиями, предъявляемыми к подобным устройствам, являются: возможность в течение длительного периода (исчисляемо-

го годами) хранить носители заряда (информацию); очень маленькое (около 1нс) время записи, а также возможность многократных (около 10^{15}) циклов записи — стирания информации.

Всем этим требованиям, возможно, будут удовлетворять QDs, изготовленные из полупроводниковых материалов третьей и пятой групп (арсенидов индия, галлия и т.п.), но не совсем обычные.

Обычно QDs получают по известному механизму Странского-Крастанова, когда сильно напряженная сплошная пленка трансформируется в систему пирамидальных островков. В нашем же случае квантовые точки представляют собой тончайшие островки чужеродного материала, получающиеся при суб-монослойном осаждении вещества и, кроме того, многократно встроенные между слоями основного материала. Предполагается, что, варьируя состав суб-монослойных квантовых точек и окружающего их материала, можно увеличить время хранения информации до нескольких лет, что внушает большой оптимизм в отношении перспектив полупроводниковой наноэлектроники.

Схематическое представление массивов квантовых точек (QDs), образующихся по механизму Странского-Крастанова (а) и при суб-монослойном осаждении материала (б)

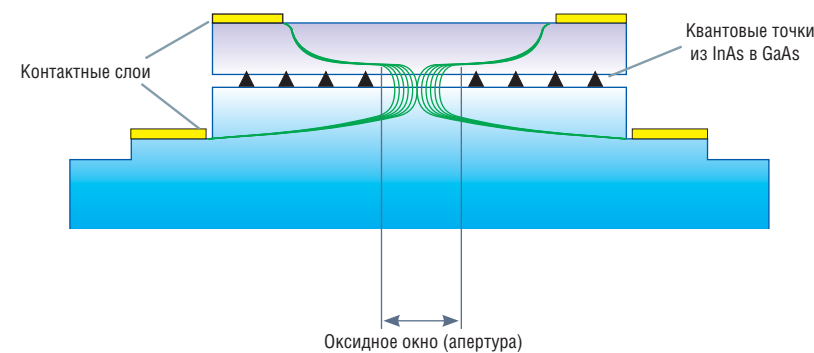
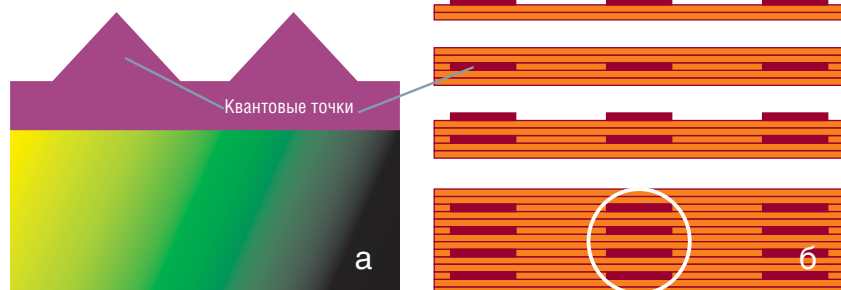


Схема однофотонного излучателя в поперечном сечении. Излучатель включает в себя слой квантовых точек (QDs) из арсенида индия, а также расположенные над каждой QD оксидные окна (апертуры) и контактные слои, необходимые для организации излучения. Технология разработана в ИФП СО РАН (Новосибирск)

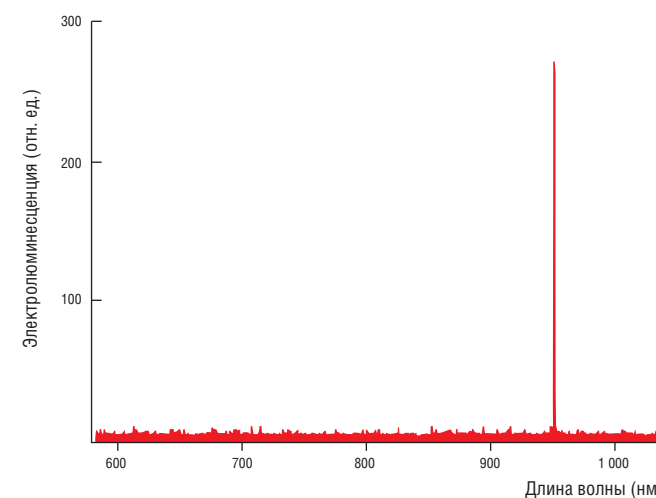
Еще более захватывающие перспективы связаны с использованием отдельных QD в качестве однофотонных излучателей в квантовой криптографии — сравнительно новом направлении исследований, позволяющем применять эффекты квантовой физики для создания секретных, абсолютно защищенных от «прослушивания» и перехвата,

каналов передачи данных, поскольку фундаментальной особенностью квантовых систем является принципиальная невозможность точного детектирования их состояния.

К. ф.-м. н. А. В. Ненашев,
к. ф.-м. н. Д. В. Щеглов,
к. ф.-м. н. Л. И. Федина

Авторы и редакция благодарят д. ф.-м. н. А. В. Латышева (ИФП СО РАН) за помощь в подготовке публикации

Фото В. Яковлева (ИФП СО РАН)



Спектр люминесценции однофотонного излучателя, где экспериментально зафиксирована электролюминесценция от одиночной квантовой точки. Ширина излучения такого излучателя не превышает 55 μeV (микроэлектронвольт), а эффективность близка к 90 %. По расчетам, для излучения одного фотона требуется рекомбинация всего пяти электронно-дырочных пар, то есть такой излучатель является почти «одноэлектронным»