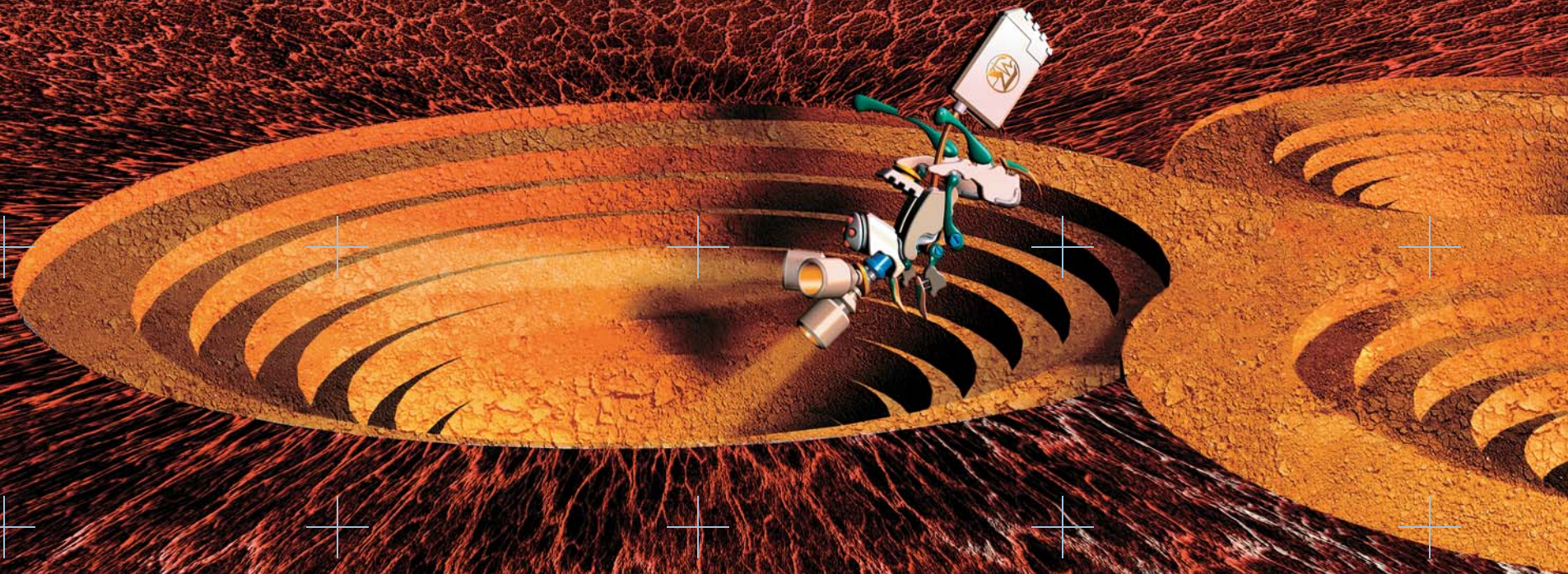


А. Л. АСЕЕВ

НАНОТЕХНОЛОГИИ:

Вчера, сегодня, завтра



Изображение спиральных атомных ступеней высотой в одно межплоскостное расстояние (0,31 нм) на поверхности кремния (111). Атомно-силовой микроскоп (Е. Е. Родякина, С. С. Косолюбов, А. В. Патышев). Из архива ЦКП СО РАН «Наноструктуры»

АСЕЕВ Александр Леонидович — академик РАН, доктор физико-математических наук, председатель СО РАН, директор Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН. Почетный член Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе РАН. Специалист по атомной структуре, электронным свойствам и диагностике полупроводниковых систем пониженной размерности. Автор более 200 научных работ, в том числе 5 монографий, 5 авторских свидетельств и 2 патентов на изобретения



Модным словом «нанотехнологии» сегодня называют самые разные области производственной деятельности. Но всех их объединяет одно: ультрамалые — не более сотни нанометров — линейные размеры используемых объектов. В этом смысле человечество применяло нанотехнологии с давних времен. Например, при приготовлении сыра использовались белки-ферменты из сычуга жвачных животных. А средневековые соборные витражи обвязаны своими яркими красками ультрадисперсным (десятки нанометров) металлическим частицам, которые образовывались при плавке стекла с добавлением различных соединений металлов. Но все же осознанно человечество начало разрабатывать и применять нанотехнологии менее десятилетия назад. Поэтому их с полным правом можно назвать «технологиями III тысячелетия»

Прежде чем говорить о нанотехнологиях, следует дать несколько основных определений этой области деятельности, поскольку единого мнения на этот счет не существует.

Самое «мягкое» определение принадлежит директору Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе РАН, члену-корреспонденту РАН А. Г. Забродскому: «Изделие можно квалифицировать как нанотехнологическое в случае, если, по крайней мере, один из его размеров находится в диапазоне от 1 до 100 нм, и этот размер существен для функций рассматриваемого прибора».

Самое «жесткое» определение можно сформулировать в четком соответствии с законом диалектического материализма о переходе количества в качество: нанобъекты должны иметь принципиально новые свойства по сравнению с соответствующими объектами, изготовленными из объемного материала. В интервал между этими крайними точками зрения попадают все объекты и технологии, которые имеют на сегодня сакральную приставку *нано-*.

При таком разбросе мнений неудивительно, что в разных областях нанонауки определение нанобъектов принимает более конкретный вид, в него вносятся существенные уточнения и дополнения. Так, что касается изделий наноэлектроники, то необходимо, во-первых, чтобы работа подобных приборов базировалась на использовании квантовых свойств наноструктур. Во-вторых, их изготовление должно быть основано на реализации эффектов самоорганизации по принципу «снизу вверх» по шкале размеров (Алфиров Ж. И. и др., 2003).

Инициативы Правительства РФ по развитию нанотехнологий:

Федеральная целевая программа «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007—2012 гг.»

Федеральная целевая программа «Развитие инфраструктуры наноиндустрии в Российской Федерации на 2008—2010 гг.»

Федеральный закон №139 от 19 июля 2007 г. «О Российской корпорации нанотехнологий»

Инициативы РАН:

Постановлением Президиума РАН № 163 от 26 июня 2007 г. образована Комиссия РАН по нанотехнологиям

В декабре 2008 г. в рамках РАН создано новое Отделение информационных и нанотехнологий

Последнее утверждение справедливо и для нанобиотехнологий. По определению академика РАН Р. В. Петрова, нанобиотехнологические изделия представляют собой принципиально новые биологические структуры, которые конструируются из природных или искусственно воспроизведенных (синтетических или генно-инженерных) наноструктур живых объектов разных биологических типов. Они создаются на основе присущей биологическим системам способности к узнаванию, самосборке или амплификации (умножению).

Нанобум

Как известно, нанотехнологии — изобретение не сегодняшнего дня. Однако положение дел в этой области в течение нескольких последних лет можно квалифицировать как настоящий «нанобум». Точкой отсчета для него можно считать 2000 г., когда президент США Билл Клинтон обнародовал в Калифорнийском технологическом институте свою «национальную наноинициативу», утвержденную затем Конгрессом США в качестве новой государственной программы с годовым бюджетом около полумиллиарда долларов.

Преемником Клинтона стал Джордж Буш, подписавший в 2003 г. закон о развитии исследований и разработок по нанотехнологиям в США. Были сформулированы главные цели нанотехнологий: создание компактных устройств нового поколения для хранения информации, материалов с прочностью выше стали, а также принципиально новых средств для доставки лекарств к больным органам человека.

Предполагается, что львиную долю в будущем общемировом рынке нанотехнологий будут занимать материалы с принципиально новыми свойствами и изделия электроники



По оценкам экспертов, в течение ближайших 8—10 лет годовой объем общемирового рынка нанотехнологий достигнет 1 трлн долларов



Участие организаций и регионов в работах ФЦП (млн руб.)

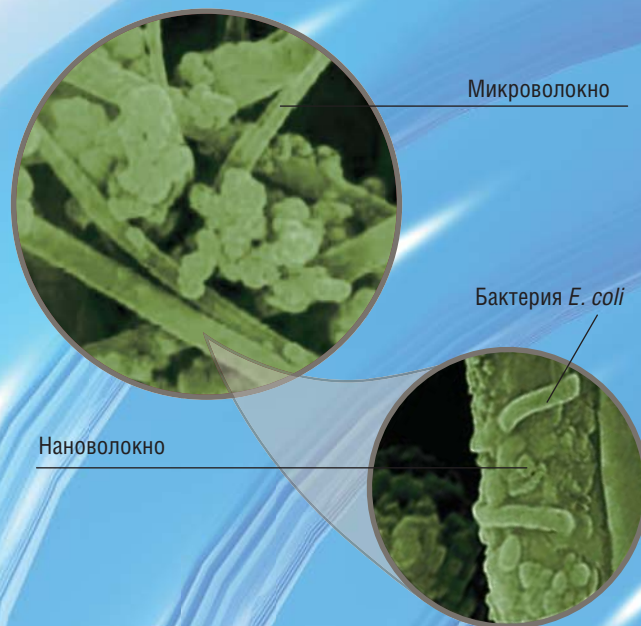
Федеральный округ	Заявки на тематику	Заявки на конкурс	Контракты	Бюджет контрактов	Внебюджет контрактов
Дальневосточный	66	89	23	166,3	54,6
Приволжский	484	426	100	773,2	719,7
Северо-Западный	661	631	154	1645,4	1659,9
Сибирский	596	526	145	683,7	382,4
Уральский	91	144	21	241,2	121,1
Центральный	2693	2795	817	7237,9	4298,8
Южный	254	224	35	267,4	239,0
Итого	5264	4842	1295	11015,0	7415,6

Состояние дел в российской «нанонауке» можно косвенно оценить по участию региональных организаций в Федеральной целевой программе по нанотехнологиям. Данные 2007 г.

Американская демонстрация достижений в новой многообещающей технологической области не оставила равнодушными правительства таких стран, как Япония, страны Западной Европы, Китай и других, спешно принявших подобную доктрину. Везде нанотехнологии вошли в число государственных приоритетов и получили щедрую финансовую поддержку. Небывалый ажиотаж вокруг этой области деятельности в большой степени подогревался бизнесом: быстро выяснилось, что в течение ближайшего десятилетия объем общемирового рынка нанотехнологий может достичь триллиона долларов в год, причем львиную

долю в нем будут занимать наноматериалы и изделия наноэлектроники.

В России нанобум инициирован позднее (2006 г.) и несколько иначе, чем в США. Первое, что сделало правительство РФ — определило головную организацию по развитию наноиндустрии, которой стал РНЦ «Курчатовский институт» (Москва). По инициативе правительства разработаны две федеральные целевые программы по развитию нанотехнологий в России. В 2007 г. принят федеральный закон «О Российской корпорации нанотехнологий» и создана государственная корпорация «Роснанотех» (ныне «Роснано»).



Наночистый материал «АкваВаллис», созданный в Институте физики прочности и материаловедения СО РАН (Томский научный центр), удерживает даже те патогены, размер которых много меньше пор фильтра. Сканирующий электронный микроскоп. Фото с сайта <<http://aquavallis.com>>

Сорбционные фильтры АкваВаллис (AquaVallis) — одна из пионерных работ сибирских нанотехнологов. Фильтровальный материал состоит из полимерных микроволокон, на которые по специальной технологии нанесены нановолокна. Принцип действия фильтров основан на сочетании двух механизмов очистки — фильтрации и адсорбции.

Частицы, размер которых превышает размер пор материала (1 мкм), удаляются из воды фильтрацией. Загрязнения меньшего размера удаляются из воды за счет адсорбции на нановолокнах. В водной среде нановолокна создают высокий положительный дзета-потенциал, позволяющий удерживать отрицательно заряженные микро-частицы, в том числе и микроорганизмы, размер которых меньше размера пор материала.

В отличие от традиционных способов обеззараживания фильтр АкваВаллис удаляет из воды термоустойчивые, а также устойчивые к хлору бактерии и вирусы. Фильтры гарантируют полную микробиологическую безопасность питьевой воды, поэтому в первую очередь предназначены для детских садов, школ, интернатов, больниц, детских лагерей.

Строящийся совместно со Словенией завод по производству наночистых фильтров АкваВаллис в полном объеме заработает в 2009 г.

Для Российской академии наук руководством к действию является первая программа. На ее реализацию заложено 130 млрд руб., но лишь треть из них будет тратиться на фундаментальные и прикладные исследования по приоритетному направлению «Индустрия наносистем и материалов».

Участие Академии наук не предполагается пока ни во второй программе, чей бюджет составляет около 30 млрд руб., ни в проектах «Роснано», средства которой (130 млрд руб.) будут направлены на внедрение перспективных нанотехнологий, способных приносить отдачу в самом ближайшем будущем. Как считает нынешний руководитель госкорпорации «Роснано» А. Чубайс, ключевая задача госкорпорации — выйти к 2015 г. на объем выпуска продукции около 1 трлн руб., т.е. соразмерный тому, что выпускают сегодня энергокомпании, созданные в ходе реформы РАО «ЕЭС».

Для обеспечения руководства научными исследованиями по нанотехнологиям создана особая комиссия РАН, которая активно работала в течение лета 2007 г. В результате чего правительство РФ утвердило поправки в Устав РАН, благодаря которым в начале 2008 г. в составе Академии наук появилось новое структурное подразделение — Отделение информационных и нанотехнологий. Его руководителем назначен президент Курчатовского научного центра и по совместительству секретарь Общественной палаты академик РАН Е. П. Велихов, а курировать нанотехнологии будет лауреат Нобелевской премии академик РАН Ж. И. Алферов.

... прирастать будет Сибирью

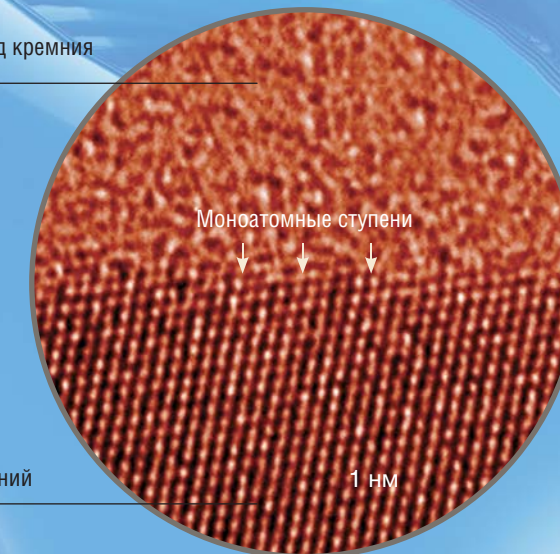
В качестве адекватного показателя активности академических учреждений в области нанотехнологических исследований могут выступать данные о распределении по регионам организаций, ставших участниками Федеральной целевой программы (ФЦП). Показательными являются данные как по числу заявок, так и по относительному числу выигранных лотов.

Сибирский регион формально выглядит достаточно благополучным, особенно на фоне Урала и Южного федерального округа. Однако если сравнить данные по числу поданных заявок, то ситуация выглядит менее оптимистичной: так, в Центральном федеральном округе подано около 3 тыс. заявок, а в Сибирском федеральном округе — только 600, т.е. в пять раз меньше.

Если же перейти к реальному финансированию (системе контрактов), то здесь разница становится еще более значительной. В Центральный округ инвестировано 7 млрд руб., в Сибирский же округ — около 700 млн руб., т.е. в десять раз меньше. Одной из основных причин

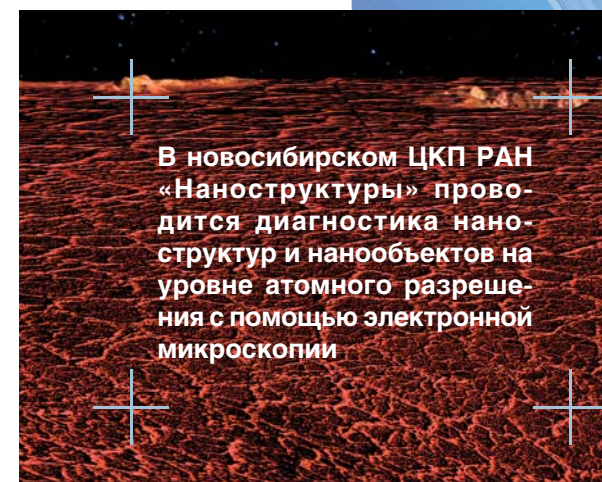
Изображение моноатомных ступеней на поверхности кремния под слоем оксида в сечении, перпендикулярном поверхности, получено с помощью высокоразрешающего электронного микроскопа JEM-4000EX. Его разрешающая способность по точкам, т.е. возможность различить две точки на определенном расстоянии, составляет 0,16 нм. Фото к. ф.-м. н. А. К. Гутаковского

Оксид кремния

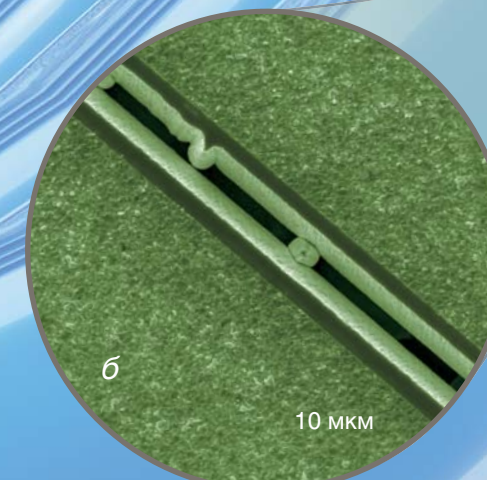


Кремний

1 нм



При изготовлении прибора на основе КРТ (кадмий—ртуть—теллур) с помощью сканирующего электронного микроскопа LEO на пленке КРТ (а) можно обнаружить непротравленные каналы (б), вызывающие электрические закоротки. Фото из архива лаборатории нанодиагностики и нанолитографии ИФП СО РАН



б

10 мкм

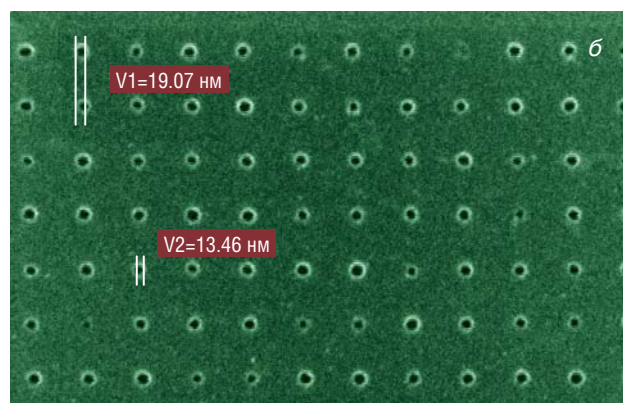
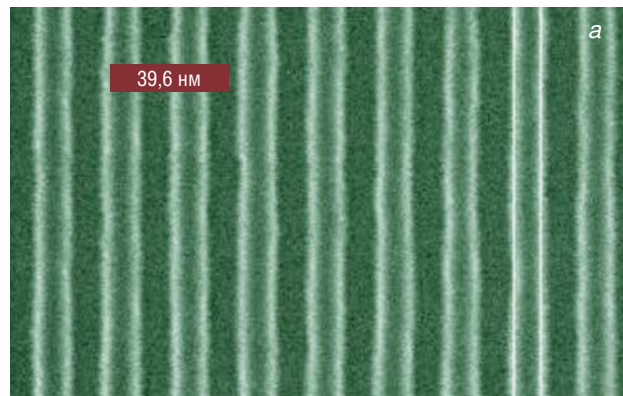
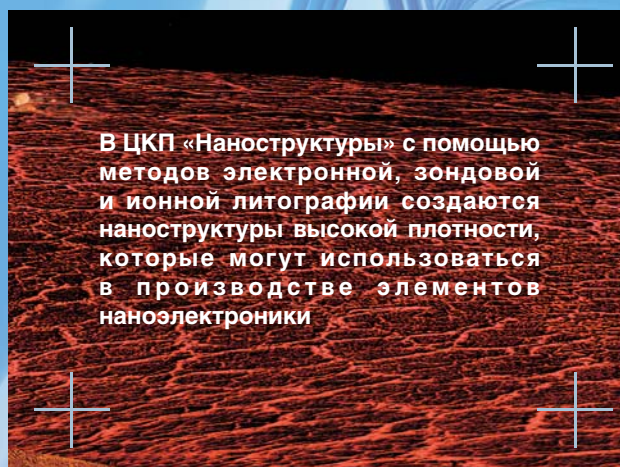


а

100 мкм



Схема последовательных этапов создания нановыступов с помощью высокоразрешающей электронной литографии



Массивы однородных элементов с минимальным размером до 40 нм (а, кремний) и 13 нм (б, нитрид титана), созданные методом высокоразрешающей электронной литографии на установке RAITH-150 с использованием органического резиста (полиметилметакрилата). Сканирующий электронный микроскоп. Фото из архива лаборатории нанодиагностики и нанолитографии ИФП СО РАН

Установка RAITH-150 для электронной литографии



такого явного различия является большая разница во внебюджетном финансировании (4 млрд руб. против 400 млн руб.).

Наличие конкретных предприятий и организаций, которые могли бы финансово поддержать поданные заявки, — исключительно важный фактор успешной реализации программы. И, как можно судить по цифрам, в Сибирском регионе таких предприятий пока еще слишком мало. (Тем не менее у нас есть некоторые основания для оптимизма: так, при проведении в Сибири в 2007 г. очередного, 15-го Международного симпозиума «Наноструктуры: физика и технология» (его организаторы — нобелевские лауреаты Ж.И. Алферов и Л. Есаки) не было никакой проблемы со спонсорами — ими стали крупнейшие мировые фирмы и несколько российских компаний, успешно работающие в сфере нанотехнологий.)

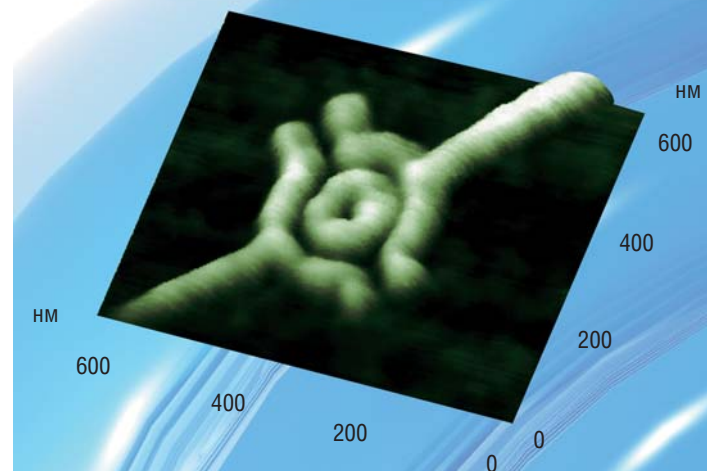
Фронт работ по нанотехнологиям в Сибирском отделении выглядит впечатляюще. Приведем несколько примеров подобных исследований, успешность которых подтверждена их поддержкой в рамках федеральной целевой программы.

Первая классическая работа, ставшая настоящим прорывом в новой области и посвященная детонационному синтезу алмазов, выполнена в Институте гидродинамики СО РАН (Новосибирск). Впервые показано, что образование ультрадисперсных алмазов происходит не внутри детонационной волны, как считалось ранее: волна лишь создает реакцию смеси (плазму), из которой затем в ходе химических реакций (а не при фазовом превращении графита) образуются наноалмазы.

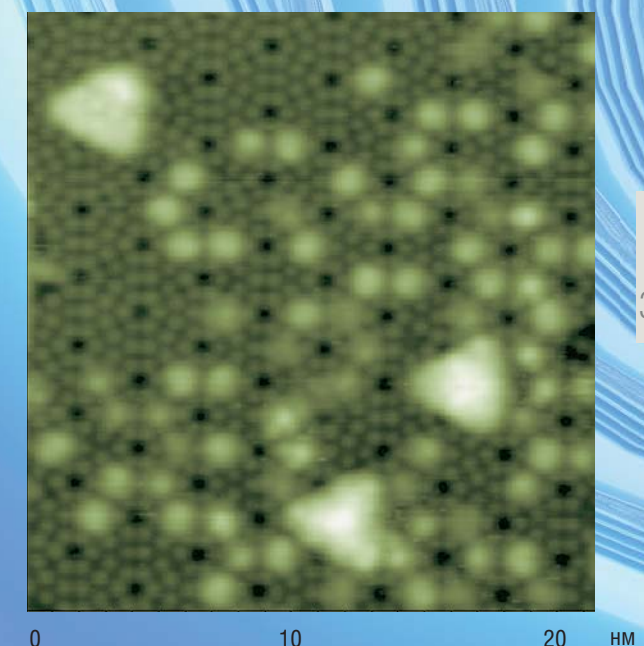
Далее следует отметить работы по созданию нанодисперсных порошков, нановолокон, различных наноматериалов, в том числе углеродных, молекулярных контейнеров. Так, в Институте физики прочности и материаловедения в Томском научном центре доведена до стадии практического применения работа по созданию нового фильтровального наноматериала «АкваВалис».

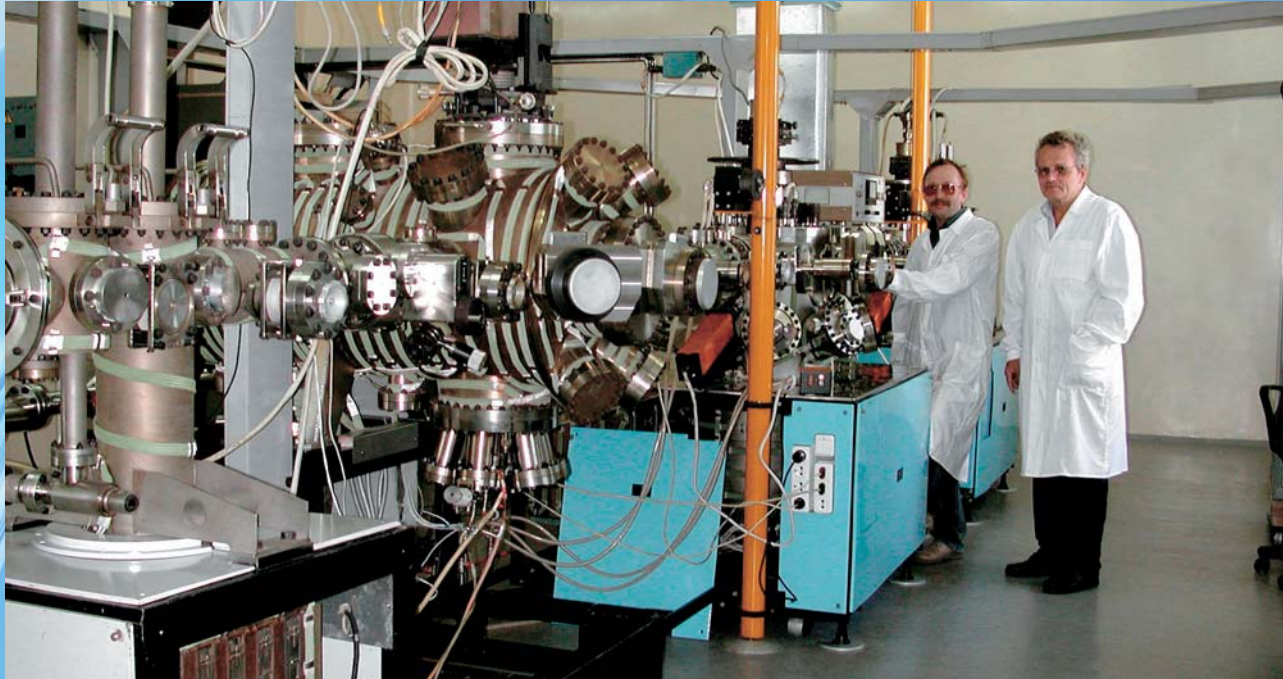
Исследователи из Института переработки углеводородов Омского научного центра достигли больших успехов в работе по созданию новых каталитических наноматериалов для очистки и фильтрации техногенных газов и жидкостей, сорбентов для выделения благородных и цветных металлов.

Особо хочется отметить созданный в 2003 г. при Институте физики полупроводников СО РАН Центр коллективного пользования СО РАН «Наноструктуры», обеспечивающий комплексную метрологическую, диагностическую и технологическую поддержку исследований в области нанотехнологий, наноматериалов и наноэлектроники. Работа этого центра отмечена грантом Министерства образования и науки РФ.



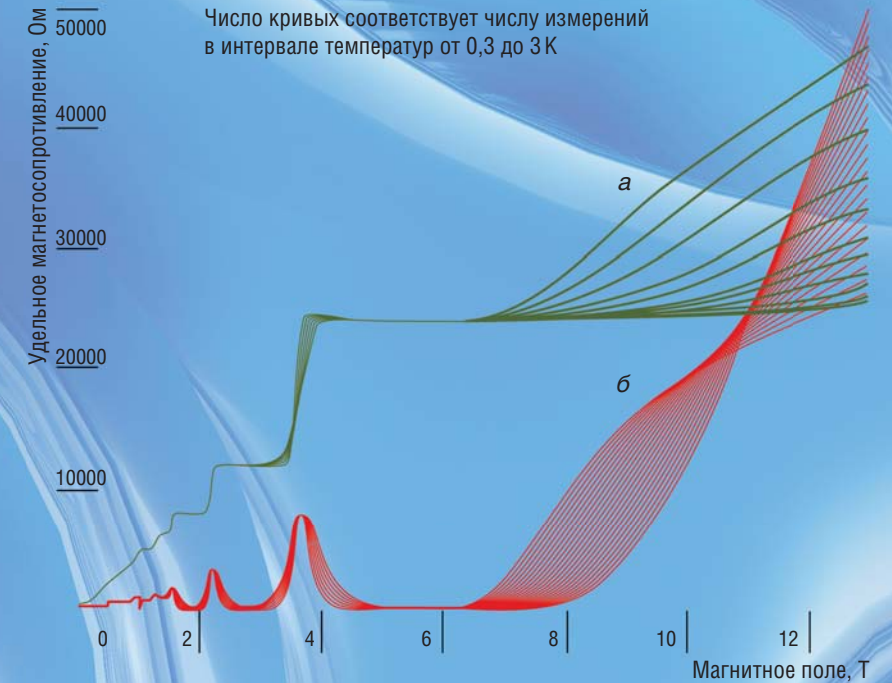
Изображение нанокластеров германия на реконструированной поверхности кремния с ориентацией (111) и шагом реконструкции (7x7). Сканирующий туннельный микроскоп (22 нм x 22 нм). Фото к. ф.-м. н. С. А. Тийса





Установка молекулярно-лучевой эпитаксии «Обь-М», на которой выращивают полупроводниковые эпитаксиальные структуры КРТ (кадмий—ртуть—теллур), разработана и изготовлена в ИФП СО РАН (Новосибирск). На фото — старший научный сотрудник Н.Н. Михайлов (слева) и заведующий отделом инфракрасной оптоэлектроники на основе КРТ, д. ф.-м. н. Ю.Г. Сидоров (справа). Фото из архива лаборатории технологии эпитаксии из молекулярных пучков соединений A_2B_6 .

Показателем высокого качества эпитаксиальных полупроводниковых наноструктур на основе КРТ (кадмий—ртуть—теллур), выращенных в ИФП СО РАН, является существование в них квантового эффекта Холла. Это явление, открытие которого отмечено двумя Нобелевскими премиями, сегодня может наблюдать любой студент старших курсов. Суть эффекта в том, что при низких температурах в сильных магнитных полях удельное магнетосопротивление проводника, измеренное перпендикулярно направлению протекания тока, с ростом величины поля изменяется ступенчато. Это подтверждает существование в структуре вырожденного двумерного электронного газа, где подвижность электронов перпендикулярно поверхности за счет тонкости слоев сильно ограничена. Поскольку значение квантованного сопротивления Холла не зависит от типа материала, его используют как стандарт сопротивления



На графике, иллюстрирующем зависимость холловского магнетосопротивления наноструктуры на основе КРТ от величины магнитного поля, отчетливо виден эффект квантования — ступенчатого изменения холловского сопротивления, измеренного перпендикулярно направлению протекания тока (а), в отличие от сопротивления, измеренного вдоль протекания тока (б). По: (Ольшанецкий Б.З. и др., 2006)

Для «войны и мира»

В ИФП СО РАН нанотехнологии базируются на установках молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), в основе которой лежит напыление различных материалов на плоские подложки в условиях сверхвысокого вакуума. Эта технология разработана почти сорок лет назад, и в настоящее время рынок производителей оборудования МЛЭ достаточно широк, причем лидируют французская фирма RIBER и американская VECCO. Однако стоимость подобных установок высока (1–2 млн евро), поэтому создание собственного оборудования для МЛЭ было инициировано в ИФП СО РАН еще при академике А. В. Ржанове в конце 1970-х гг.

На основе гетероструктур КРТ, производимых в институте методом молекулярно-лучевой эпитаксии, уже созданы различные приборы оборонного назначения — тепловизионные системы наведения и пеленгации, а также продукция гражданского назначения. Исследования по последней тематике поддерживаются госконтрактом с Министерством образования и науки РФ благодаря тому, что ОАО «Российские железные

дороги» гарантировало сбыт оптоэлектронных систем, позволяющих контролировать тепловое излучение букс подвижного состава, в размере 1,5 млрд руб. Этими системами планируется оснастить все отечественные железные дороги.

Большим успехом исследователей из ИФП СО РАН можно считать создание эпитаксиальных полупроводниковых структур для полевых высокочастотных транзисторов. В содружестве с новосибирским предприятием «Октава» и томским «Микран» удалось создать лучшие на настоящий момент усилители с мощностью 6 Вт на частоте 10 GHz — антенные фазированные активные решетки. Поскольку один модуль включает в себя несколько тысяч усилительных трактов, их размеры и характеристики во многом определяют компактность и эффективность подобных устройств.

Институт по праву гордится еще одним своим достижением — лазером с вертикальным резонатором на основе полупроводниковых наноструктур. Это самый миниатюрный в мире источник когерентного излучения. Лазер создан в содружестве с петербургскими и немецкими коллегами, но сами наноструктуры и тех-

Метод молекулярно-лучевой эпитаксии, позволяющий наращивать отдельные атомные слои из различных материалов на поверхности подложки из полупроводника, является одной из технических основ нанoeлектроники

Куратор исследований по нанотехнологиям в РАН академик РАН Ж. И. Алферов высоко оценил работы сотрудников новосибирского Института физики полупроводников СО РАН. 2007 г. Слева направо: к. ф.-м. н. А. К. Гутаковский, академик Ж. И. Алферов, чл.-кор. РАН А. В. Латышев, академик А. Л. Асеев. Фото В. Яковлева





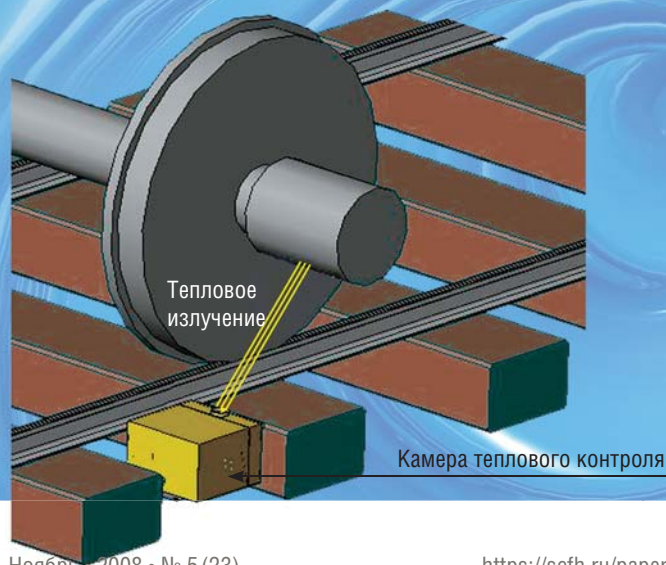
Фотоприемная матрица на основе КРТ

В многоэлементном фотоприемном устройстве «Вакуум» используется эпитаксиальный материал КРТ. *Продукция ОАО «Сапфир» (Москва)*

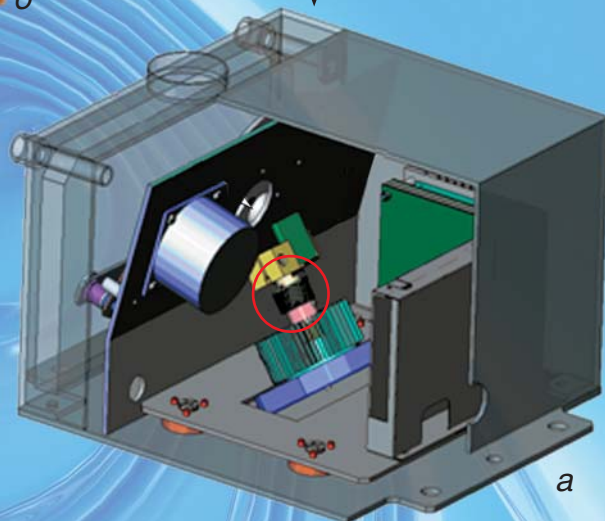
В камере теплового контроля буксы железнодорожного колеса (а) установлено фотоприемное устройство на основе структур КРТ (б). Камера предназначена для обеспечения безопасности работы буксовых узлов современного подвижного железнодорожного состава при скорости поезда до 400 км/ч. *Продукция ОАО «Сапфир» (Москва)*



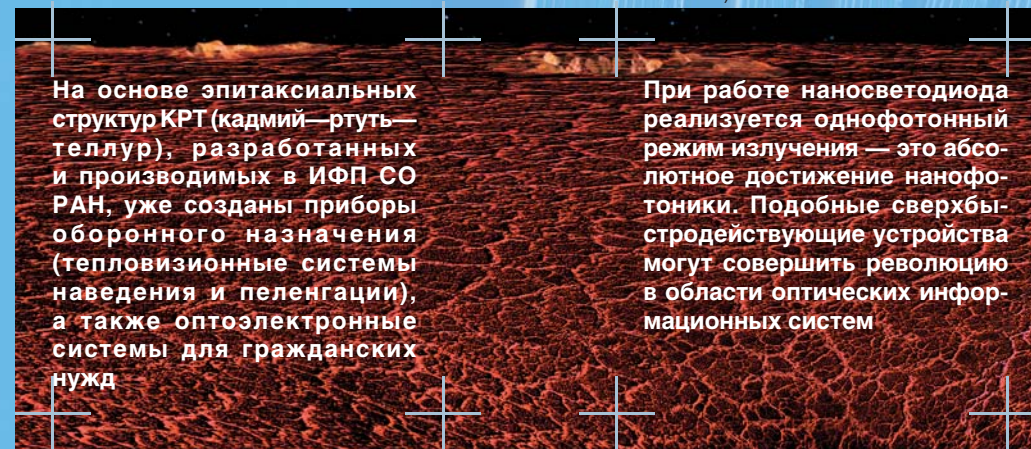
Фотоприемное устройство на основе КРТ



Камера теплового контроля

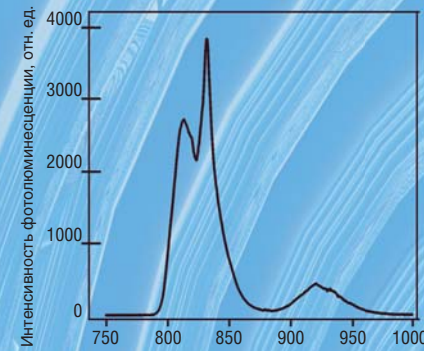


а

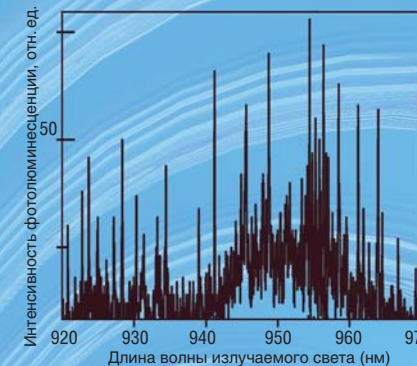


На основе эпитаксиальных структур КРТ (кадмий—ртуть—теллур), разработанных и производимых в ИФП СО РАН, уже созданы приборы оборонного назначения (тепловизионные системы наведения и пеленгации), а также оптоэлектронные системы для гражданских нужд

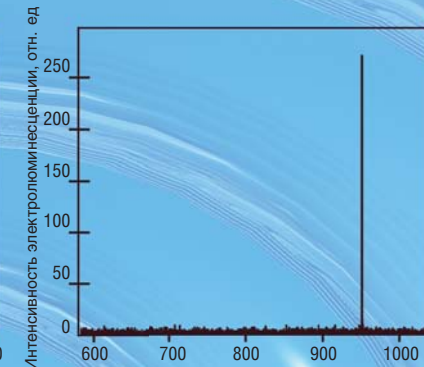
При работе наносветодиода реализуется однофотонный режим излучения — это абсолютное достижение нанопотоники. Подобные сверхбыстродействующие устройства могут совершить революцию в области оптических информационных систем



а) Фотолюминесценция массива квантовых точек при лазерном облучении (диаметр лазерного пятна 100 мкм)



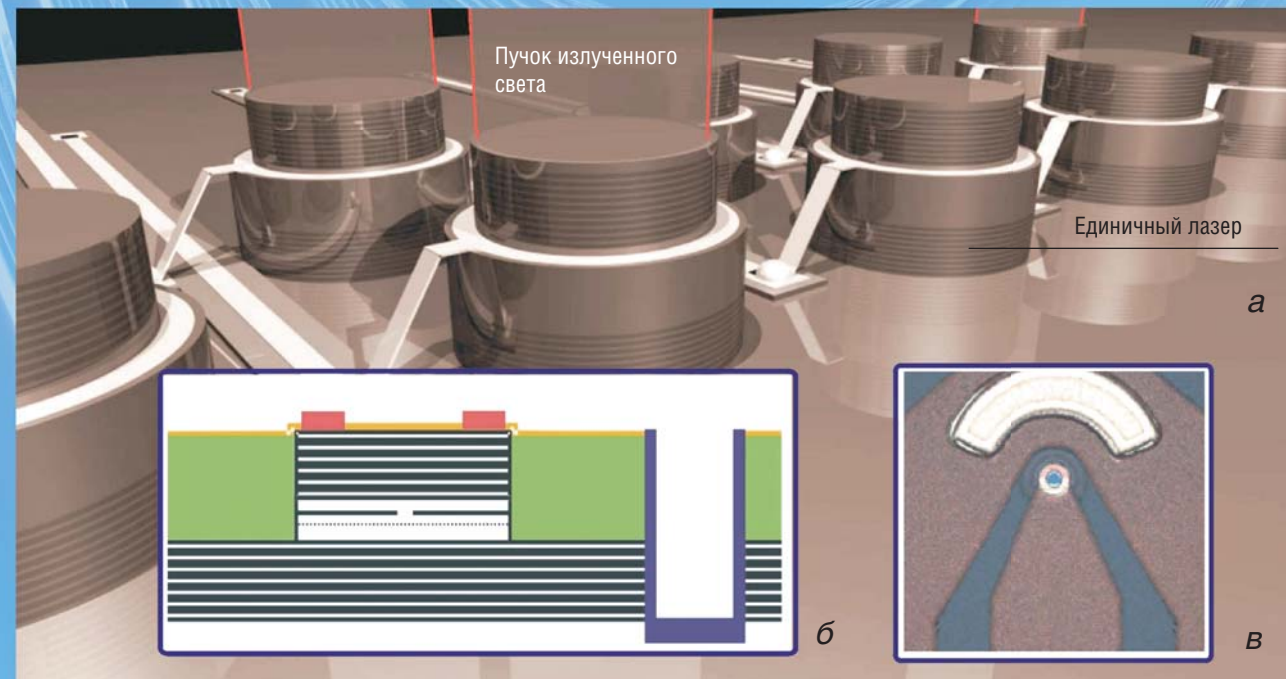
б) Микрофотолюминесценция квантовых точек (диаметр лазерного пятна 2 мкм)



в) Нанозлектролюминесценция при пропускании тока (диаметр токовой апертуры 0,85 мкм)

По мере уменьшения диаметра пятна лазера при оптическом возбуждении фотолюминесценции или уменьшении оксидной апертуры светодиодов при токовом возбуждении, характер излучения массива квантовых точек InAs (индий—мышьяк) принципиально меняется: широкая полоса излучения (а) превращается в лес излучений от отдельных квантовых точек (б), и в предельном случае виден абсолютно четкий единичный пик — излучение от одной квантовой точки (в)

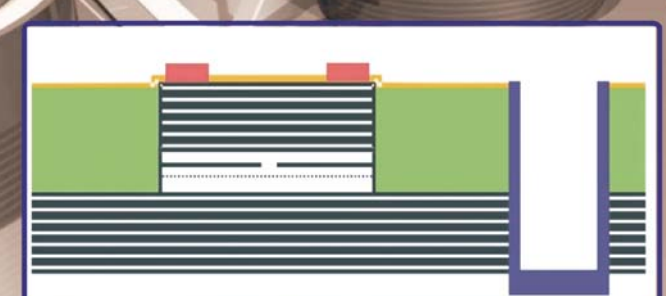
Схема оптической системы параллельной передачи информации на основе массива лазеров с вертикальным резонатором (а). б — схема единичного лазера (поперечный разрез); в — оптическая микрофотография единичного лазера (вид сверху). *Разработка Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН (Новосибирск), Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе РАН (С.-Петербург), Института физики твердого тела и Центра нанопотоники Технического университета Берлина (Германия)*



Пучок излученного света

Единичный лазер

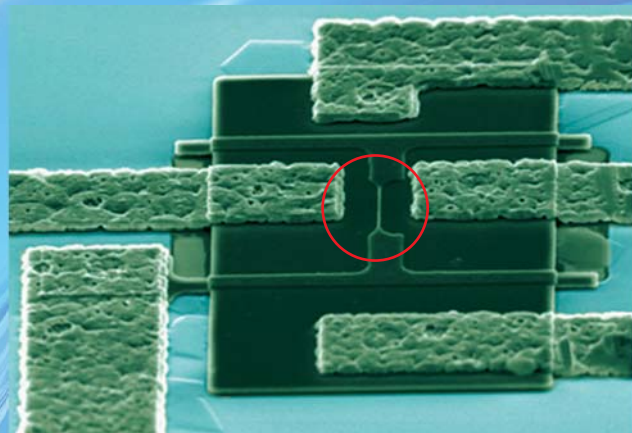
а



б



в



Созданный по уникальной технологии МОП-нотранзистор (на системе кремний на изоляторе) предполагается использовать в качестве сенсора органических молекул (разработка лаборатории технологии кремниевой микроэлектроники, рук-во д.ф.-м.н, В.П. Попова). Фото из архива лаборатории нанодиагностики и нанолитографии ИФП СО РАН



Согласно расчетам, относительное изменение тока нанопроволочки транзистора — сенсора органических молекул — при присоединении молекулы с единичным зарядом зависит от величины потенциала подложки.

При этом нанопроволочка демонстрирует разную чувствительность к зарядам противоположного знака. Изменение потенциала подложки позволяет реализовать работу нанопроволочки (протекание тока) в режиме транзисторного (экспоненциального) усиления, что обеспечивает высокую чувствительность устройства при взаимодействии с заряженными органическими молекулами

Чувствительность сенсора органических молекул, разрабатываемого в ИФП СО РАН, оценивается в 10 молекул на 1 мм² раствора. Это открывает большие возможности для его использования в биологии и медицине

нология их получения разработаны в ИФП СО РАН.

Используемые в лазере сложноорганизованные наноструктуры, включающие в себя сотни тончайших слоев с квантовыми ямами и квантовыми точками, по ряду параметров не имеют аналогов в мире. Они характеризуются быстройдействием в десятки гигабит в секунду, благодаря чему появляется возможность достичь на матричных элементах фантастической скорости передачи данных — терабит в секунду (1 Тбит = 10^{12} бит).

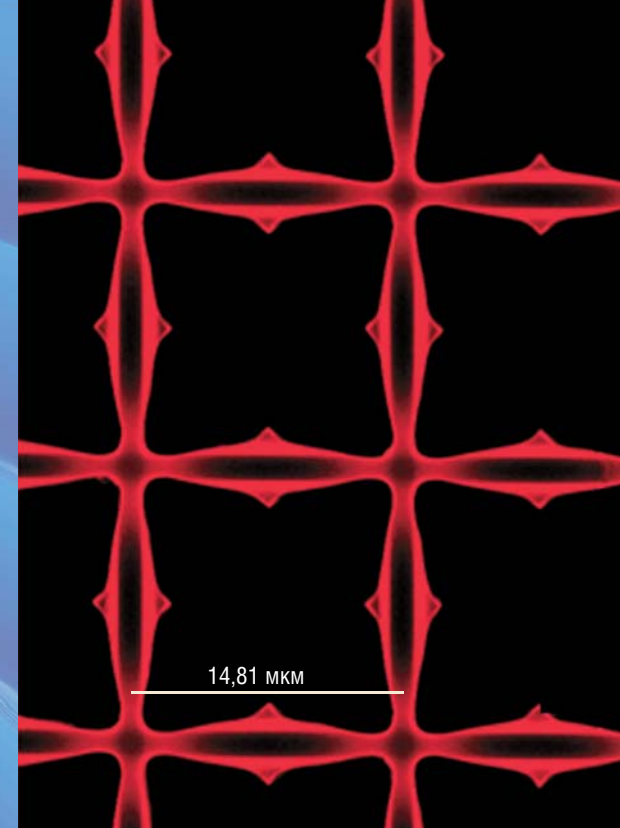
Это — настоящая революция в области межчиповых и межплатных соединений, имеющая самое непосредственное отношение к обеспечению эффективности и компактности вычислительных систем. Сверхбыстродействующие полупроводниковые лазеры с вертикальным резонатором могут применяться как в квантовой криптографии и прецизионной спектроскопии, так и в качестве эталона оптической мощности.

Считанные молекулы

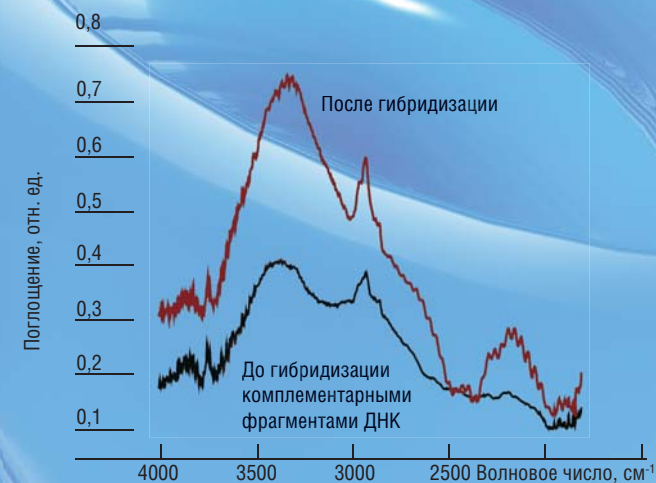
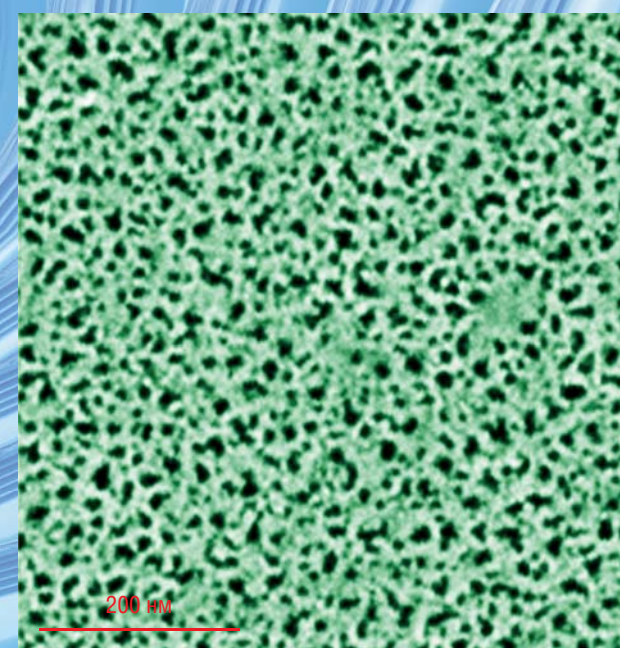
Области практического применения полупроводниковых наноструктур поистине безграничны — это настоящие проводники в мир высоких технологий.

Так, для решения биологических задач в ИФП СО РАН разработано оригинальное нанoeлектронное устройство, представляющее собой МОП-нотранзистор, изготовленный на системе металл—кремний на изоляторе, длина затвора которого составляет десятки нанометров.

Согласно предварительным расчетам, на поверхности этого транзистора можно фиксировать единичные заряды, что открывает возможности для использования его как счетчика органических молекул. Разработка этой технологии также поддержана госконтрактом.

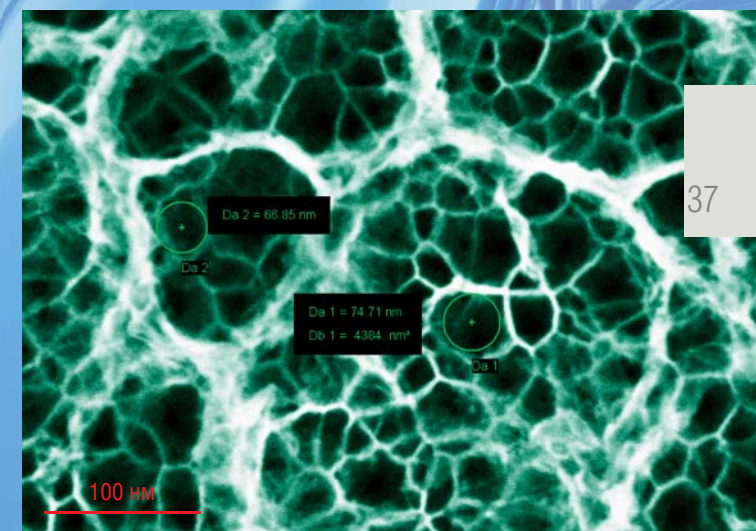


Микро- и наноканальные пластины из монокристаллического кремния могут быть использованы для регистрации крупных органических молекул и фильтрации ультрадисперсных биологических молекул и наночастиц

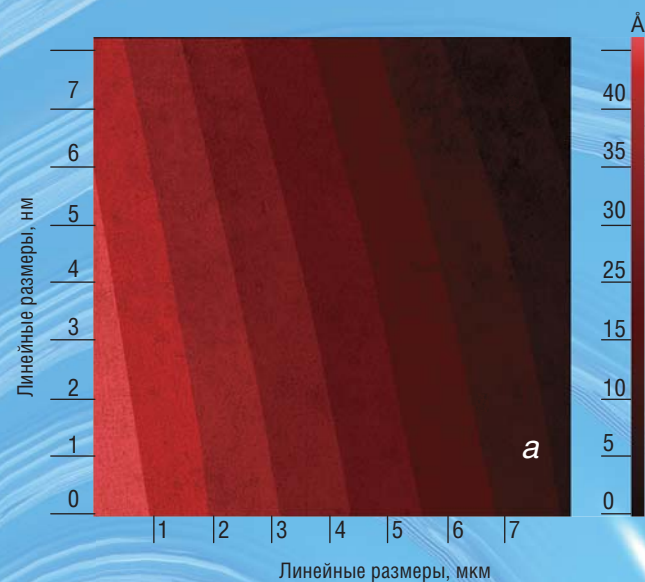


Оптический микроканальный сенсор ДНК представляет собой кремниевую пластину с каналами размером 15 × 15 мкм (фото слева), внутри которых осаждается определенное число олигонуклеотидных зондов-меток (фрагментов ДНК). При прохождении света через такую пластину фиксируются пики поглощения в ИК-диапазоне. Если в раствор добавить молекулы ДНК, то последние могут комплементарно связаться с молекулами-метками, иммобилизованными на пластине. По изменению поглощения в ИК-спектре можно судить о наличии реакции гибридизации (связывания) ДНК. Разработка ИФП СО РАН и ИХБФМ СО РАН

Пористая структура из монокристаллического кремния с размером пор до 10 нм предназначена для фильтрации биологических молекул и частиц в нанодиапазоне. Сканирующий электронный микроскоп. Результаты предоставлены к.ф.-м.н С.И. Романовым



Все стандарты в области нанотехнологий должны быть заменены на квантовые. Стандарт электрического заряда может быть создан на основе одноэлектронных эффектов в наноструктурах; эталон нанометра для калибровки нанометровых размеров — на основе моноатомных ступенек на поверхности кремния



а

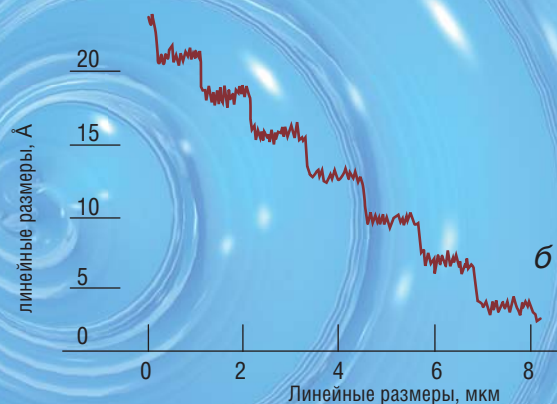
При перемещении зонда атомно-силового микроскопа по атомно-гладкой поверхности монокристаллического кремния видно, что ее рельеф изменяется ступенчато. Ступень является моноатомной, причем ее высота составляет 0,31 нм.

а — топографическое АСМ-изображение; б — профиль рельефа;

в — спиральная моноатомная ступень, возникающая в точке выхода винтовой дислокации на поверхность. Темные пятна — двумерные ямки травления высотой 0,31 нм.

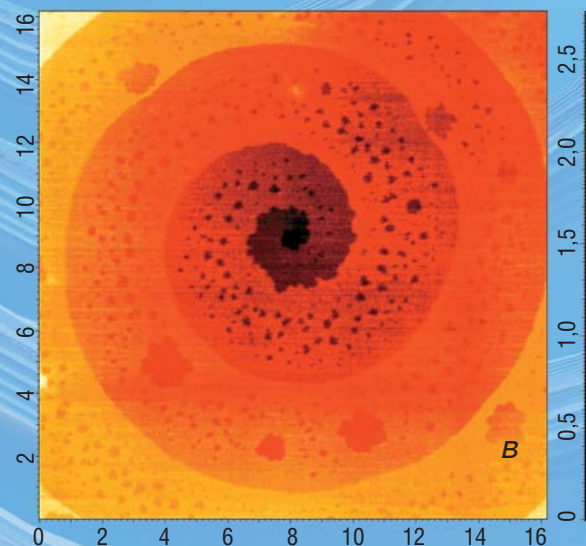
Разработка ЦКП «Наноструктуры».

Фото из архива лаборатории нанодиагностики и нанолитографии ИФП СО РАН

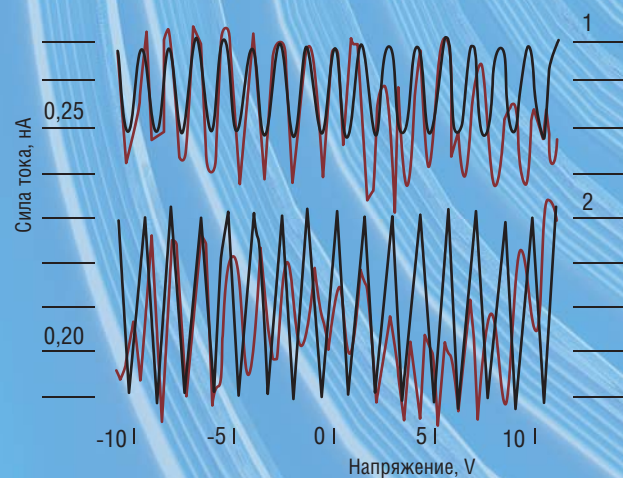


б

Скан — победитель Международного конкурса СЗМ сканов компании NT-MDT в 2007 г. (Е.Е. Родякина, С.С. Косолобов, Д.В. Щеглов, А.В. Латышев)



в



При низкой температуре изменение напряжения на один вольт в системе с двумя туннельными переходами (титан—оксид титана) вызывает одну осцилляцию тока, соответствующую туннелированию одного электрона через переход.

По: (Литвин Л.В., 2003)

Совместно с Институтом химической биологии и фундаментальной медицины СО РАН ведутся исследования по использованию микро- и наноканальных пластин, изготовленных из монокристаллического кремния, для регистрации крупных органических молекул и фильтрации ультрадисперсных биологических молекул и наночастиц соответственно.

Так, для микроканальных пластин впервые показана возможность регистрации в инфракрасном диапазоне реакции гибридизации (связывания) олигонуклеотидных меток (фрагментов ДНК, предварительно «защитных» в каналах пластины) с комплементарными участками исследуемой ДНК. Важно отметить, что вся используемая для этого приборная база, включая Фурье-ИК-спектрометр и ИК-микроскоп, также разработана и сделана в ИФП СО РАН.

На стадии проекта находится еще одна совместная уникальная разработка — устройство для чтения структуры ДНК. Предполагается, что с помощью подобных устройств можно будет делать полный анализ генома человека за несколько тысяч долларов в считанные дни. Пока же этот анализ стоит сотни тысяч долларов и занимает несколько месяцев.

Для подобных устройств нужны мембраны с точно калиброванными отверстиями в диапазоне 1–70 нм, в зависимости от метода считывания. С помощью высокоразрешающей электронной литографии в ИФП СО РАН уже научились изготавливать двумерные системы отверстий размером до 13 нм. Для электрического чипа, чтобы считать ДНК на основе одиночной нанопоры, требуются отверстия на порядок меньше. Тем не менее по имеющейся технологии в принципе уже можно изготовить мембраны с двумерной системой отверстий размером 35–70 нм, требующихся для чтения ДНК с помощью конфокальной микроскопии.

Существует еще одна очень важная проблема, малоизвестная широкой публике, — метрологическое обеспечение нанотехнологий. Это означает, что все стандарты в этой области должны быть заменены на квантовые. И в этом плане полупроводниковые структуры дают возможность создать стандарт электросопротивления на основе квантового эффекта Холла, стандарт вольта и стандарт электрического заряда на основе одноэлектронных эффектов в наноструктурах. В качестве примера последнего эффекта можно привести одноэлектронные осцилляции в системе с двумя туннельными переходами (в наноструктуре титан—оксид титана).

Кроме того, в ИФП СО РАН предложен вариант эталона нанометра на основе элементарных ступенек на атомно-гладкой поверхности монокристаллического кремния, которые могут рассматриваться как «кванты» рельефа поверхности или первичные эталоны. Предельно высокая точность изготовления такого эталона может быть обеспечена за счет привязки значений па-

раметров моноатомных ступеней к термодинамически равновесным (при заданных температуре и давлении) параметрам кристаллической решетки совершенного кремниевого кристалла.

Разработанные в настоящее время методы и технологии позволяют создавать тест-объекты для прецизионной калибровки устройств, с помощью которых проводятся измерения линейных размеров структур, используемых в нанотехнологиях. Такие тест-объекты, созданные в ИФП СО РАН, уже используются известной российской фирмой NT-MDT для калибровки производимых ею атомно-силовых микроскопов.

Будущее начинается сегодня

Фантастические перспективы развития нанотехнологий в области наноэлектроники схематически можно представить в виде своеобразного «генеалогического» дерева.

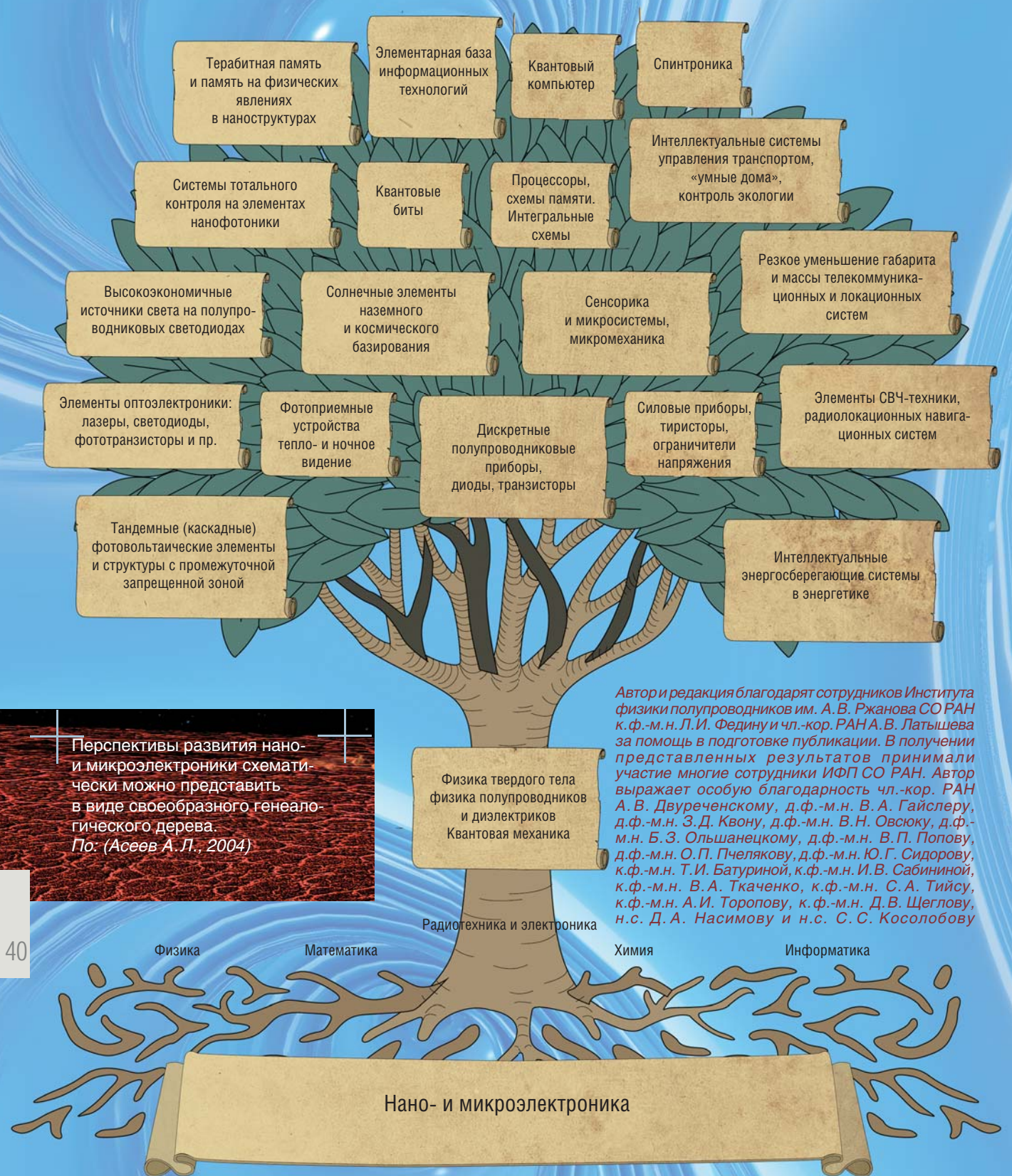
Уже в самом ближайшем будущем ожидается появление массово производимых, а потому дешевых и доступных фотоприемных устройств и элементов, а также высокоэкономичных источников света на основе полупроводниковых структур. Последние заменят все использующиеся сегодня источники света, эффективность которых не превышает несколько десятков процентов.

Далее будут созданы системы тотального контроля на элементах нанофотоники. Появятся интеллектуальные энергосберегающие системы в энергетике, интеллектуальные системы управления транспортом, «умные» дома, системы контроля экологических параметров окружающей среды.

В будущем резко уменьшатся габариты и масса телекоммуникационных систем. Центральным направлением станет революция в информационных технологиях и вычислительных системах: появятся такие элементы компьютеров, как квантовые биты, и, в далеком будущем, — квантовый компьютер, терабитная память.

Квантовые компьютеры смогут радикальным образом улучшить криптографические системы, которые используются для защиты передачи конфиденциальной информации. В перспективе квантовые компьютеры будут использоваться для ускоренного поиска в базах данных, создания систем аутентификации пользователя на основе его цифровой подписи.

Спинтроника (область квантовой электроники, в которой для физического представления информации наряду с зарядом используется спин частиц, связанный с наличием у них собственного механического момента) в приложении к наноструктурам создается уже сейчас. Наноэлектроника широко оперирует квантовыми эф-



Авторы редакция благодарят сотрудников Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН к.ф.-м.н. Л.И. Федину и чл.-кор. РАН А.В. Латышева за помощь в подготовке публикации. В получении представленных результатов принимали участие многие сотрудники ИФП СО РАН. Автор выражает особую благодарность чл.-кор. РАН А.В. Двуреченскому, д.ф.-м.н. В.А. Гайслеру, д.ф.-м.н. З.Д. Квону, д.ф.-м.н. В.Н. Овсянко, д.ф.-м.н. Б.З. Ольшанецкому, д.ф.-м.н. В.П. Попову, д.ф.-м.н. О.П. Пчелякову, д.ф.-м.н. Ю.Г. Сидорову, к.ф.-м.н. Т.И. Батуриной, к.ф.-м.н. И.В. Сабининой, к.ф.-м.н. В.А. Ткаченко, к.ф.-м.н. С.А. Тийсу, к.ф.-м.н. А.И. Торопову, к.ф.-м.н. Д.В. Щеглову, н.с. Д.А. Насимову и н.с. С.С. Косоолову

Перспективы развития нано- и микроэлектроники схематически можно представить в виде своеобразного генеалогического дерева.
По: (Асеев А.Л., 2004)

фектами: туннелирование электронов и квантование электронных уровней в квантовых ямах приводят к изменению плотности состояний в низкоразмерных полупроводниковых структурах. Активно разрабатывается направление, связанное с квантовыми битами и квантовыми системами из двух состояний. В ближайшем будущем предполагается использовать и так называемое *запутанное состояние** квантовой системы из двух частиц.

Квантовая механика обещает нам еще много практических приложений, в том числе и совершенно неожиданных. Например, тонкие сверхпроводящие пленки нитрида титана при определенных условиях становятся идеальными изоляторами (сверхизоляторами). Их сопротивление возрастает в 100 тыс. раз, что позволяет говорить о существовании нового квантового состояния вещества — сверхизоляции (V. Vinokur, T. Baturina et al., 2008). Как и сверхпроводник, сверхизолятор — система, в которой отсутствуют джоулевы потери энергии. Из этого состояния система может быть выведена пороговым образом при приложении напряжения или магнитного поля. Пока такое состояние вещества обнаружено только при сверхнизких температурах (около 0,2 К), что, по мнению экспертов, открывает перспективы для технологий, ориентированных на космос (создание электронных устройств — переключателей, диодов, магнитных сенсоров и т.д. с характеристиками, близкими к идеальным).

Итак, пусть и с опозданием, но «нанобум» начался и в России. И хотя во многом он пока носит «виртуальный» характер (основным нанотехнологическим изделием у нас до сих пор являются нанопорошки, т.е., по западным меркам, нанопродукты предыдущего поколения), тем не менее у нас есть главное — научная база и ученые, которые начали работать в этой области задолго до шумихи, поднятой средствами массовой информации.

Все необходимое для развития исследований в этой области деятельности — инфраструктура и высококвалифицированные кадры — есть и в Сибирском отделении РАН. Судя по имеющимся у наших ученых достижениям мирового уровня, СО РАН имеет все шансы стать одним из форпостов наноиндустрии в России.

В любом случае не нужно забывать, что «ахиллесова пята» нашей страны не в недостатке светлых голов и умелых рук, а в сложности внедрения научных разработок в практику. Поэтому, несмотря на весомую поддержку наноиндустрии государством, надо, по образному выражению бывшего российского премьер-министра Михаила Фрадкова, чтобы уже и «бизнес знал, что если он сегодня не пойдет в нанотехнологии, он пропустит все на свете. И будет, в лучшем случае, в телогрейке работать на скважине, которую будут обслуживать и управлять наши друзья и партнеры».

***Запутанность** — способность частиц микромира (атомов, фотонов, электронов) объединяться в пары при их сближении так, что квантовые состояния этих частиц всегда будут связаны, даже если после этого частицы в прямом смысле развести по разным городам. Чтобы использовать запутанные квантовые состояния в практических целях, надо научиться создавать их, передавать на значительное расстояние, а затем отделять внешние воздействия (шумы) и получать «чистое» состояние. Если представить себе, что некий «шарик» может быть черным или белым, то применительно к компьютерной начинке мы можем говорить о «нуле» и «единице» или о том, что «шарик» кодирует один бит. В микромире, живущем по законам квантовой механики, «шарик» — электрон, фотон или ядро атома — может находиться в суперпозиции, т.е. в промежуточном состоянии между нулем и единицей. Но это не будет «шарик» серого цвета, как можно было бы предположить по аналогии с привычным миром, а некое соотношение вероятностей того, что мы увидим этот «шарик» либо черным, либо белым. Следовательно, число состояний «шарика» фантастически велико!

Литература
Алферов Ж.И., Асеев А.Л., Гапонов С.В. и др. *Нанотехнологии и зондовая микроскопия // Микросистемная техника.* — 2003. — № 8. — С. 3.
Асеев А.Л. *Нанотехнологии в полупроводниковой электронике // Вестн. РАН.* — 2006. — Т. 76, № 7. — С. 557–562.
Асеев А.Л. *Наноматериалы и нанотехнологии для современной полупроводниковой электроники // Российские нанотехнологии.* — 2006. — Т. 1, № 7. — С. 97–110.
Атомная структура полупроводниковых систем / Отв. ред. акад. РАН Асеев А.Л. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. — 292 с.
Латышев А.В., Асеев А.Л. *Моноатомные ступени на поверхности кремния. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. — 242 с.*
Нанотехнологии в полупроводниковой электронике / Отв. ред. чл.-кор. РАН Асеев А.Л. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. — 368 с.
Olshanetsky E.B., Sami S., Kvon Z.D. et al. *Quantum Hall liquid-insulator and plateau-to-plateau transitions in a high mobility 2DEG in HgTe quantum well // JETP Letters.* — 2006. — Т. 84, N 10. — P. 661–665.
Vinokur V.M., Baturina T.I., Fistul M.V. et al. *Superinsulator and quantum synchronization // Nature.* — 2008. — N 452. — P. 613–616.