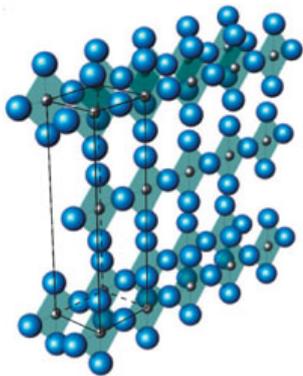


В этом выпуске:

СВЕРХПРОВОДНИКИ

Купратные ВТСП: в поисках потерянной интенсивности

В литературе сейчас активно обсуждается возможность спаривания носителей заряда в купратных ВТСП за счет их взаимодействия со спиновыми флуктуациями, то есть с магнитными степенями свободы. Для описания магнетизма купратных ВТСП обычно используют модель Гейзенберга, предполагая, что в родительской антиферромагнитной фазе электроны локализованы на ионах Cu^{2+} . Экспериментально проверить такие теории нефононной сверхпроводимости, в принципе, можно измеряя спектры неупругого рассеяния нейтронов (INS, inelastic neutron scattering): изменение интенсивности INS-спектров при сверхпроводящем переходе дает количественную информацию об энергии спиновых флуктуаций, ответственных за спаривание носителей. Однако в подавляющем большинстве экспериментов абсолютная величина INS-интенсивности оказывается существенно меньше, чем ожидается из фундаментального правила сумм (проблема “потерянной” интенсивности). В работе [1] показано, что причина этого заключается в ковалентной природе связей Cu-O: сильная гибридизация орбиталей $\text{Cu}(3d)$ - $\text{O}(2p)$ приводит к образованию синглета Жанга-Райса, в котором волновая функция дырки локализована преимущественно на атомах кислорода, а не на атомах меди, как предполагается в упрощенных моделях типа Хаббарда. Авторы [1] детально исследовали магнитные возбуждения в родственном купратном ВТСП квазиодномерном соединении Sr_2CuO_3 (см. рис.), для которого недавно была разработана точная теория динамического спинового отклика.



Кристаллическая структура Sr_2CuO_3 .

Оказалось, что $3d-2p$ гибридизация действительно ведет к существенному изменению INS-интенсивности. Таким образом, ионная картина магнетизма (спины – на $3d$ -орбиталях ионов Cu^{2+}) в купратах не работает. Фурье-анализ INS-спектров позволяет, помимо прочего, определить вид орбиталей Ванье, занятых неспаренными электронами в антиферромагнитном состоянии. Результаты этого анализа

хорошо согласуются с численными расчетами.

Л. Оленов

1. A.C.Walters et al., *Nature Phys.* 5, 867 (2009).

Универсальная взаимосвязь энергии магнитного резонанса и сверхпроводящей щели в “необычных” сверхпроводниках

Согласно сложившейся терминологии, к “обычным” относят сверхпроводники со слабым межэлектронным взаимодействием и фононным механизмом куперовского спаривания, тогда как сверхпроводимость материалов с сильными кулоновскими корреляциями называют “необычной”, что отчасти связано с ее предполагаемым

И далее ...

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОЭЛЕКТРОНИКА

- 2 Свет соединяет ядра
- 3 Религия и нанотехнологии: взаимное исключение или консолидация?
- 4 Кулоновские корреляции в двухслойном графене

Сверхпроводимость в молекулярном транзисторе из фуллерена C_{60}

МИКРОТЕХНОЛОГИИ

- 4 Плащ-невидимка, бытовые черные дыры и другие чудеса новой оптики

НАНОМАТЕРИАЛЫ

- 6 Углеродные нанотрубки защищают и от воды, и от огня

СПИНТРОНИКА

- 7 Тепло, еще теплее...

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

- 8 Измерение механических характеристик двух- и трехслойных углеродных нанотрубок и жгутов
- 9 Влияние полярности электрического поля на рост вертикально ориентированных углеродных нанотрубок

10 ТОРЖЕСТВО

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Свет соединяет ядра

Частота работы больших интегральных схем почти не увеличивается, и это заставляет компьютерную технику развиваться в направлении совершенствования архитектуры. Современные персональные компьютеры все больше и больше начинают напоминать суперкомпьютеры: число ядер процессора нарастает. Возникает проблема обмена информацией между ними. Обычные металлические соединения оказались неэффективными – у них слишком велика задержка. Выход найден в беспроводных соединениях, в частности, оптических.

Естественное пожелание для всякого соединения состоит в том, чтобы изготовление его элементов хорошо сочеталось с кремниевой технологией. Для оптического соединения необходимы: источник света, световод, модулятор и приемник. В идеале должно получиться нечто, представленное на рис. 1.

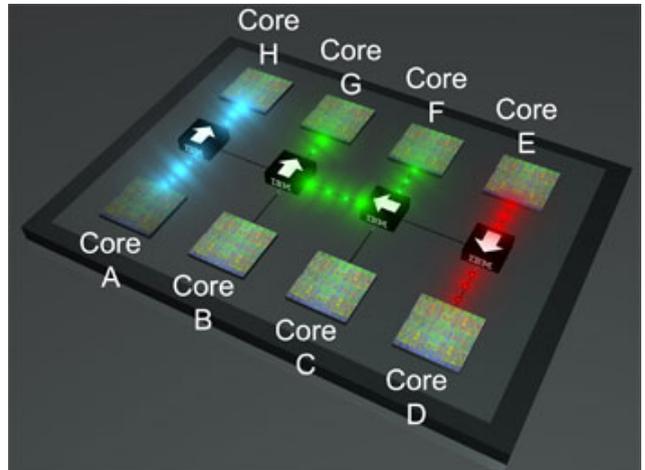
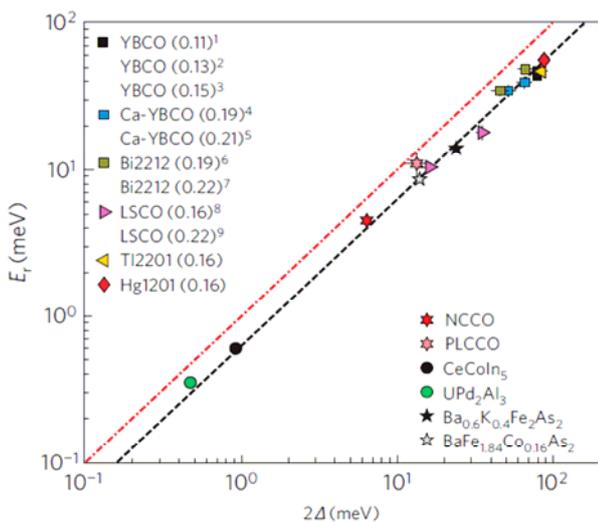


Рис. 1. Фотопереключатели позволяют передавать данные между ядрами процессора со скоростью свыше 1 Тб/сек.

В качестве материала световода можно использовать просто кремний. Сложности возникают с другими элементами. Сам по себе кремний является прямозонным материалом, в нем запрещены прямые оптические переходы между зонами. Для полупроводниковых инжекционных лазеров хорошо подходят прямозонные полупроводники, например, группы $A^{III}B^V$, поэтому кремниевая технология вынуждена использовать гибридный лазер. В качестве “рабочего тела” лазера применяется слой полупроводника группы $A^{III}B^V$, который буквально приклеивается на кремниевый световод. В качестве быстродействующего фотоприемника можно сформировать гетероструктуру, содержащую множество Si-Ge квантовых ям. Это все достаточно обычные элементы. Самым необычным элементом, пожалуй, выступает модулятор. Предполагается его сделать на основе интерферометра Маха-Цендера с кремниевыми световодами. В плечах интерферометра к ним добавляются p^+ и n^+ контакты, так что возника-

нефононным механизмом. Типичными представителями этого класса сверхпроводников являются соединения с тяжелыми фермионами, купратные ВТСП и недавно открытые безмедные ВТСП. При $T < T_c$ в магнитных спектрах всех необычных сверхпроводников наблюдается так называемый “резонанс” – коллективная мода магнитных возбуждений со спином 1. Уже довольно давно было подмечено, что в купратных ВТСП имеет место прямая пропорциональность между энергией резонансной моды E_r и критической температурой: $E_r = (5 \div 6) k_B T_c$. Позднее, однако, выяснилось, что для многих ВТСП (в том числе недодопированных и n -типа) эта взаимосвязь между E_r и T_c нарушается. В работе [1] специалисты из Stanford Univ. и Univ. of Minnesota (США) показали, что универсальное соотношение все же имеет место, но не между E_r и T_c , а между E_r и сверхпроводящей щелью Δ , причем выполняется оно не только для всех купратных ВТСП (берущих свое начало от моттовского диэлектрика), но также и для безмедных ВТСП (с коллективизированным типом магнетизма), и для сверхпроводников с тяжелыми фермионами: $E_r/2\Delta = 0.64 \pm 0.04$ (см. рис.). При этом для сверхпроводников с d -волновой симметрией параметра порядка Δ принимается максимальная величина щели на поверхности Ферми. Примечательно, что очень строгая линейная зависимость E_r от Δ выполняется в чрезвычайно широком диапазоне (величины Δ различаются на два порядка), то есть, как для высокотемпературных, так и для низкотемпературных “необычных” сверхпроводников (см. рис.). Крайне маловероятно, что это просто случайность. Магнитные возбуждения определенно играют какую-то важную роль в “необычной” сверхпроводимости. Вопрос – какую?



Энергия магнитного резонанса E_r как функция сверхпроводящей щели Δ в различных сверхпроводниках.

1. G.Yu et al., *Nature Phys.* 5, 873 (2009).

ет р-і-п диод (рис. 2). Напряжение на нем управляет заполнением световода носителями, которые изменяют величину диэлектрической проницаемости. Это приводит к изменению скорости света. В результате происходит фазовая задержка волны. При согласовании фаз на выходе интерферометра волна проходит, при рассогласовании – нет. В итоге, сочетание всех названных элементов может позволить передавать данные между ядрами процессора со скоростью свыше 1 Тб/сек. Для коммутации сигналов, как на рис. 1, на выходе интерферометра Маха-Цендера должно стоять полупрозрачное зеркало.

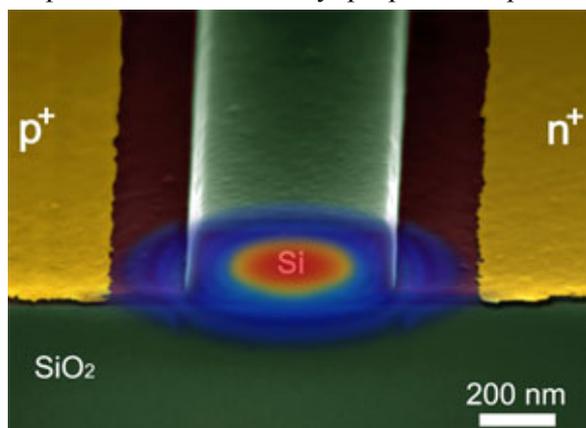


Рис. 2. Диод p^+i-n^+ , управляющий диэлектрической проницаемостью кремниевого световода (i-слоя).

В.Вьюрков

Информация с сайта <http://www.semiconductor.net/>

Религия и нанотехнологии: взаимоисключение или консолидация?

В одном из последних номеров журнала Nature Nanotechnology опубликована довольно любопытная статья под названием “Бог в лаборатории” (“God in the lab”) [1]. Ее автор, Крис Туоми, сотрудник Наноцентра университета Южной Каролины, затрагивает интересную проблему, а именно, каким образом религия может повлиять на такую перспективную и интенсивно развивающуюся сейчас область науки, как нанотехнологии? Предпосылкой написания статьи стало активно обсуждаемое в американских СМИ назначение Фрэнсиса Коллинза на пост главы Национальных Институтов Здравоохранения (National Institutes of Health), основного правительственного учреждения, оказывающего организационную и финансовую поддержку научным исследованиям в области биомедицины. Дело в том, что этот, безусловно, талантливый врач-генетик, долгое время руководивший Национальным институтом по исследованиям генома человека (National Human Genome Research Institute), является евангельским христианином. Коллинз придерживается позиции, согласно которой наука и религия ищут одну и ту же истину пусть и различными способами, и только их гармоничное сочетание откроет новые перспективы: поможет всесторонне понять Человека и законы При-

роды. Взгляды Коллинза не раз подвергались нападкам со стороны исследователей, приверженцев научного атеизма, по мнению которых верующие ученые отходят от таких основополагающих принципов науки, как объективное восприятие мира и непредвзятость, свобода мышления.

По результатам социологических исследований, проведенных в США в 2005 г. группой Элайн Экланд, из 1646 ученых, работающих в области естественных наук, 48% являются верующими, а согласно результатам общего социологического опроса 2004 г. 14% населения США не имеют религиозных убеждений. Исследования “Центра Пью” (Pew Research Center) 2009 г. подтверждают полученные группой Экланд результаты: 82% населения США и 48% ученых из 2533 опрошенных респондентов религиозны. В сущности, наука едина, поэтому не стоит делить исследователей на тех, кто работает в области нанотехнологий и всех остальных. Принимая это во внимание, а также приведенные данные социологических опросов, можно сделать вывод, что почти каждый второй ученый, деятельность которого связана с “нано”, является верующим.

Необходимо отметить, что спор между религией и наукой существовал всегда, и чаще всего в центре конфликта оказывается теория эволюции (наверное, в этом вопросе стороны никогда не смогут прийти к единому мнению). Ее связь с нанотехнологиями слишком незначительна, но наверняка в скором времени проявят себя какие-то новые религиозные аспекты, способные поддержать полемику и в этой области знаний. Не составляет особого труда представить себе ситуацию, аналогичную случаю Фрэнсиса Коллинза: известный ученый с мировым именем в сфере нанотехнологий получает назначение на высокий руководящий пост, однако доподлинно известно, что человек он глубоко верующий. Какого курса он будет придерживаться? Какую политику руководства выберет? И, самое главное, как отреагирует на это нанотехнологическое сообщество? Вопрос очень сложный. Более того, существует множество религий, практик и конфессий. Это означает, что изначально ошибочно уравнивать взгляды всех верующих представителей науки.

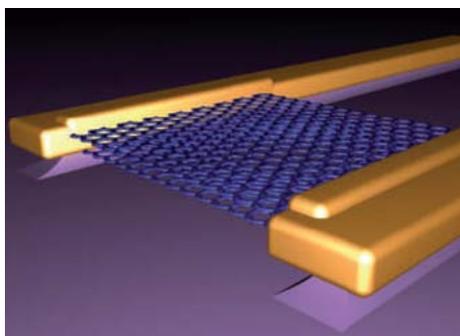
Конечно, следует особо подчеркнуть, что упомянутые выше социологические исследования относятся только к США, поэтому примерять их на другие страны было бы неправильно. Тем не менее, вопросы, которые поднимает Туоми в своей статье, не теряют актуальности и в значительной степени применимы и для других государств. Итак, полемика между атеизмом и религией в науке продолжается, и, маловероятно, что ее удастся избежать и на “наноуровне”.

М. Маслов

1. C. Toumey, *Nature Nanotech.* 4, 696 (2009).

Кулоновские корреляции в двухслойном графене

Большинство экспериментальных исследований электронных свойств графена выполнено на однослойных образцах “толщиной” в один атом. Между тем и с фундаментальной, и с практической точек зрения большой интерес представляет вопрос о том, как эти свойства изменяются при увеличении числа слоев N . Но даже при $N = 2$ электронный беспорядок оказывается столь значительным, что подвижность носителей заряда резко уменьшается, в результате чего многие эффекты наблюдать не удается. Сотрудники Гарвардского университета изготовили очень качественные образцы двухслойного графена, “подвесив” их над подложкой [1] (см. рис.). Они обнаружили квантование холловской проводимости $\sigma_{xy} = \nu e^2/h$ в магнитном поле $H \sim 0.1$ Тл, что на порядок меньше, чем в графеновом монослое, причем $\nu = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3$, то есть снимается восьмикратное вырождение нижнего уровня Ландау в биграфене. Проанализировав полученные результаты, авторы пришли к выводу, что расщепление этого уровня в ~ 10 раз больше, чем предсказывают все без исключения одночастичные модели. Следовательно, наиболее вероятной причиной такого расщепления является межэлектронное взаимодействие. Сильные кулоновские корреляции в сочетании с электрон-дырочной симметрией могут привести к ряду новых необычных эффектов.



Двухслойный графен между двумя металлическими контактами.

1. V.E.Feldman et al., Nature Phys. 5, 889 (2009).

Сверхпроводимость в молекулярном транзисторе из фуллерена C_{60}

Одномолекулярные транзисторы (single-molecule transistors, SMTs) привлекают к себе внимание в связи с их предполагаемым применением в устройствах обработки квантовой информации. Основная проблема здесь заключается в наличии у полупроводниковых SMTs лишь небольшого числа каналов с квантованной проводимостью, каждый с большим сопротивлением $R_K/2 = h/2e^2 \approx 13$ кОм. Один из возможных путей ее решения заключается в использовании сверхпроводниковых электродов, что должно приводить к возникновению в SMT дальних сверхпроводящих корреляций за счет эффекта близости. В работе [1] французские физики изготовили

такие SMTs из молекул фуллерена C_{60} и алюминия. На их вольт-амперных характеристиках наблюдались особенности, обусловленные сосуществованием и конкуренцией межэлектронного кулоновского взаимодействия, эффекта Кондо и эффекта Джексона. В дальнейшем авторы [1] планируют изучить характеристики СКВИДа со слабой связью из магнитной молекулы.

1. C.B.Winkelmann et al., Nature Phys. 5, 876 (2009).

МИКРОТЕХНОЛОГИИ

Плащ-невидимка, бытовые черные дыры и другие чудеса новой оптики

В электронном журнале открытого доступа Physics, выпускаемого Американским физическим обществом с целью освещения наиболее интересных публикаций в серии Physical Review, а также новых тенденций в физике, появилась статья английского теоретика Джона Пендри [1], посвященная оптике метаматериалов (сред с экстраординарными электромагнитными свойствами) и, в частности, плащам-невидимкам. Эта тема, в силу своей волшебной притягательности, все чаще появляется на страницах изданий, в том числе и весьма далеких от науки.

В самой идее невидимости нет ничего магического, поскольку она не противоречит законам электромагнетизма и оптики. Свет далеко не всегда движется по прямой линии и в среде с переменным показателем преломления может распространяться по довольно причудливым траекториям (примером тому являются всем известные миражи). Поэтому нет ничего принципиально невозможного в том, чтобы создать оболочку, которая направляла бы лучи света в обход объекта (рис. 1а). Формально подобный ход луча можно описать как путешествие луча в пространстве с искривленной метрикой (рис. 1б).

Более хитроумный способ спрятать объект – окружить его оболочкой, которая полностью компенсировала бы фазовые набег, возникающие при преломлении лучей в самом объекте (рис. 1в). Правда, данный способ применим только для прозрачных тел, и, кроме того, при создании оболочки не обойтись без материала с отрицательным показателем преломления (т.н. левой среды [2]). В левой среде преломленный луч располагается по ту же сторону от нормали к поверхности, что и падающий луч, этим объясняется странный ход лучей на рис. 1в.

Несмотря на то, что в иных популярных изданиях о создании плащей-невидимок говорится как о деле уже решенном, до практического использования еще далеко. В настоящее время на основе оксида кремния получена структура, больше похожая на шапку-невидимку, скрывающую объект, расположенный в полости под ней [3]. Прodelывая в диэлектрике отверстия субволновых размеров (рис. 2а), удалось создать такой профиль показателя пре-

ломления, что лучи отражаются от структуры так, словно под ним находится плоское зеркало (рис. 2б). Даже если закрыть глаза на то, что принцип реализован в двумерной геометрии и что жесткой шапке далеко до облегчающего тело плаща (это ско-

рее технические вопросы), остается одна принципиально важная проблема – невидимость самой скрывающей оболочки. Зеркальная поверхность не может считаться совершенно невидимой.

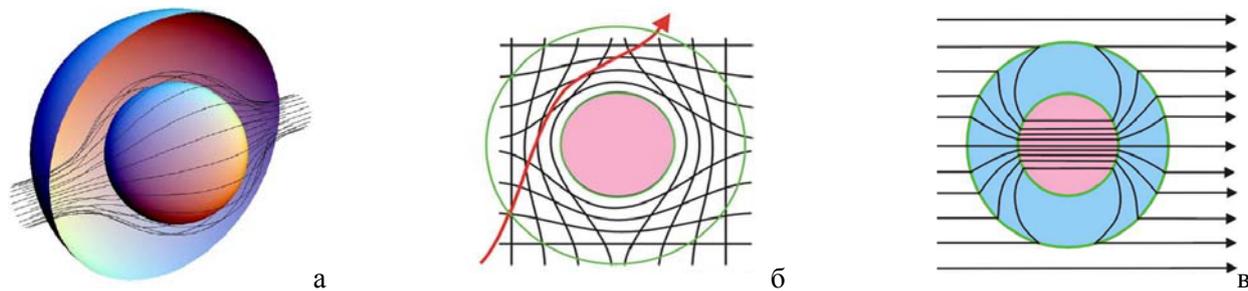


Рис. 1. а - Концепция плаща-невидимки: лучи обходят объект со всех сторон и продолжают свой путь, как если бы его не было вовсе; б - луч света в среде с переменным показателем преломления формально можно описать как прямую линию в пространстве с искривленной метрикой; в - оболочка из материала с отрицательным показателем преломления компенсирует набег фаз в скрываемом объекте (прозрачной сфере) [1].

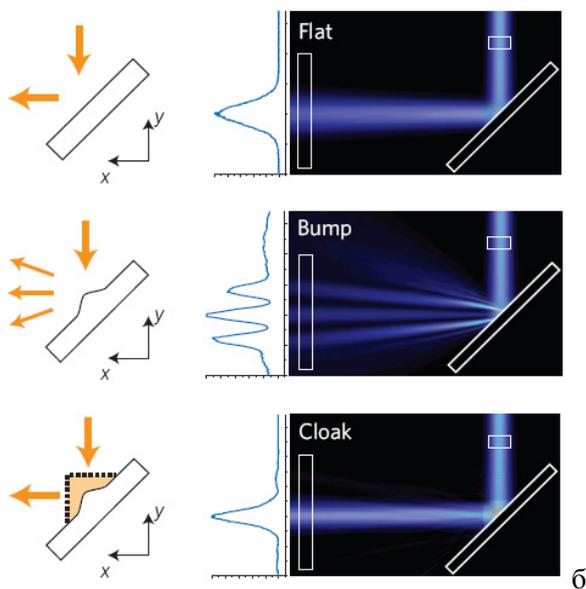
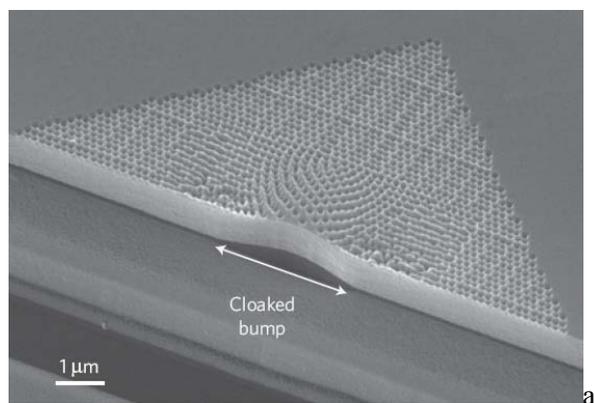


Рис. 2. Шапка-невидимка на основе пластины кремний-на-изоляторе: а - изображение в электронном микроскопе (впереди видно углубление в которое помещается скрываемый объект); б - в верхнем ряду – отражение от плоского зеркала, в среднем – отражение от предмета, в нижнем – отражение от предмета, накрытого шапкой невидимкой.

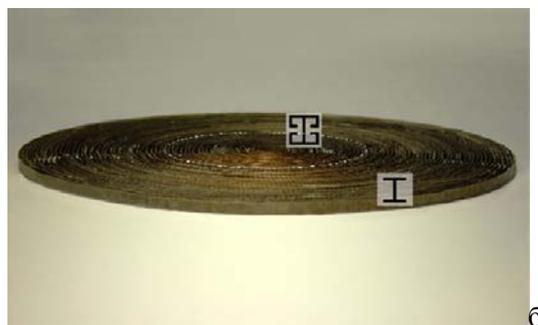
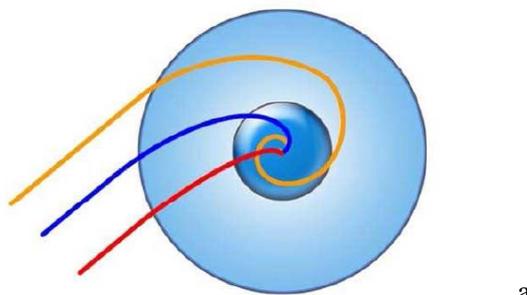


Рис. 3. Электромагнитная черная дыра: а - схематическое изображение хода лучей; б - реализация для волн СВЧ сантиметрового диапазона (диаметр структуры 20 см, высота 5 мм, 60 колец).

Задача, прямо противоположная проблеме невидимости — создание оптической черной дыры, стояла перед авторами [4]. Это должен быть объект, который поглощал бы все излучение, падающее на него, направляя лучи к центру и не давая им выйти наружу (рис.3а). Такое устройство могло бы работать в качестве светоулавливателя в солнечных батареях.

Пока удалось создать прототип черной дыры для СВЧ волн сантиметрового диапазона из металлических элементов, схематически изображенных на рисунке 3б. Меняя параметры и форму элементов от периферии к центру, достигают переменного показателя преломления для волн и эффекта улавливания излучения. Скоро, возможно уже в следующем году, можно ждать таких же устройств, но в оптическом диапазоне.

Сегодня оптические черные дыры представляются более реалистичными объектами, нежели плащи и шапки-невидимки, хотя может быть, дело в нашем нежелании верить в чудеса и привычке полагать очевидное истинным. Что же, поживем – увидим ... а, вдруг, действительно, *не увидим?*

А. Пятаков

1. J. Pendry, *Physics* 2, 95 (2009).
<http://physics.aps.org/articles/v2/95>
2. В.Г. Веселаго, *УФН* 179, 689 (2009).
3. J.Valentine et al., *Nature Mater.* 8, 568 (2009).
4. Q.Cheng, T.J.Cui, *arXiv:0910.2159*

НАНОМАТЕРИАЛЫ

Углеродные нанотрубки защищают от воды, и от огня

Несмотря на замечательные свойства, углеродные нанотрубки (УНТ) пока еще не завоевали рынок. В большинстве случаев они используются для научных исследований, создания опытных наноустройств и отдельных изделий. Это связано с высокими ценами и сложностью масштабного производства. Правда, в одной области применения наблюдается заметное продвижение вперед. Речь идет о защитных покрытиях. Даже небольшие добавки углеродных нанотрубок приводят к значительным улучшениям свойств материалов, применяемых для создания как антикоррозионных, так и огнезащитных покрытий.

Норвежская компания Advanced Marine Coatings, специализирующаяся на разработке покрытий для морских судов, представила новое покрытие, в составе которого впервые использованы углеродные нанотрубки Baytubes® (углеродные нанотрубки марки Baytubes® в промышленном масштабе производит компания BayerMaterialScience, входящая в состав концерна Bayer) [1]. В результате повысилась сопротивляемость абразивному изнашиванию, уменьшилось гидравлическое сопротивление между корпусом судна и водой, что привело к существенному снижению расхода топлива. Новое покрытие “Green Ocean Coating Heavy Duty”, основу которого составляет двухкомпонентная эпоксидная смола, имеет высокую водонепроницаемость и в особенности подходит для защиты корпуса судна ниже поверхности воды. Покрытия могут применяться как для новых судов, так и для восстановления старых или текущего ремонта. Еще одно преимущество – благодаря гладкости и твердости нового покрытия можно не применять специальные средства, предохраняющие суда от биологического обрастания. Таким образом, нанотрубки позволили разработчикам найти наиболее экономичное и наиболее экологичное решение. На рис.1 показан танкер Berge Arzew, для которого было впервые использовано новое покрытие (на 700 квадратных метров поверхности). В ноябре 2009 г. появилось сообщение об успешных испытаниях [1].



Рис.1 Испытания покрытия “Green Ocean Coating Heavy Duty” успешно проведены на танкере Berge Arzew.

Еще одно интересное практическое применение нанотрубок – огнезащитные покрытия. УНТ могут быть использованы вместо обычных галогенсодержащих антипиренов (причем в существенно меньших количествах) для повышения термостойкости полимеров и тепловых барьерных слоев на их основе. На рис.2 показано, как добавление менее 1 масс.% УНТ снижает риск распространения пламени.

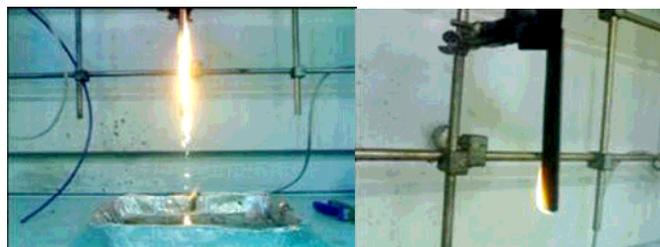


Рис.2. Слева – быстрое горение исходного полиэтилена с образованием капель, справа – материал с добавками 1 масс.% УНТ горит гораздо медленнее, капли не образуются [2].

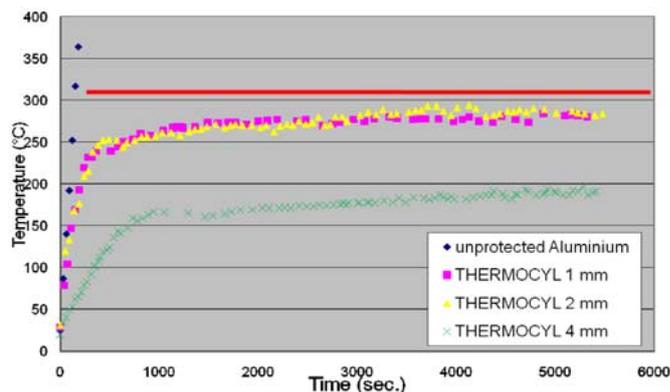


Рис.3. Термический барьер из полимера с добавками 1 масс.% УНТ (THERMOCYL™) [2].

THERMOCYL™ (марка материалов на основе кремнийорганических смол с добавками многостенных УНТ (≤ 1 масс.%), компания Nanocyl) по данным разработчиков является отличным материалом для защиты от пламени и обладает высокой

адгезией к стеклу, металлам, дереву и др. [2]. На рис.3 показано, что 4 мм покрытия THERMOCYL™ достаточно для создания эффективного барьерного слоя на алюминии.

Конечно, успешные внедрения некоторых материалов не означают прекращения научных исследований. Так, например, китайские ученые недавно продемонстрировали, что декорирование многостенных УНТ фуллеренами способствует дальнейшему снижению воспламеняемости композита полипропилен/нанотрубки [3]. Авторы разработали новую трехстадийную методику получения C₆₀-d-CNTs (C₆₀ decorated CNTs). Схема синтеза и SEM изображения приведены на рис.4.

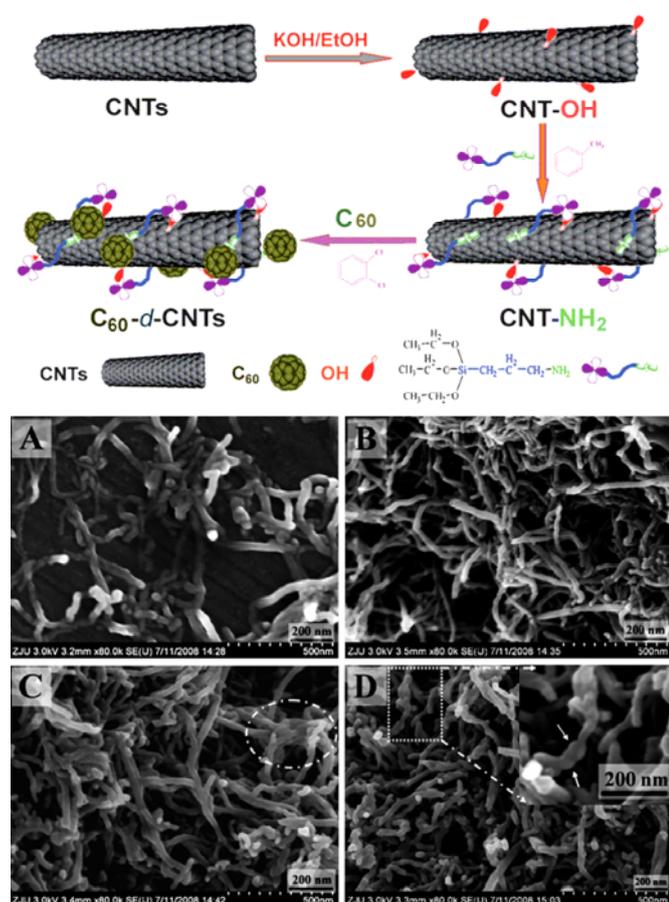


Рис.4. Схема синтеза и изображения, полученные методом сканирующей электронной микроскопии (SEM): (A) – исходные нанотрубки, (B) CNT-OH, (C) CNT-NH₂, (D) C₆₀-d-CNTs.

Данные электронной микроскопии, ИК и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и др. убедительно демонстрируют, что фуллерены находятся на поверхности нанотрубок. Результаты калориметрических измерений показали снижение воспламеняемости полипропилена, в который были введены добавки декорированных нанотрубок (1 масс.%). На рис.5 представлены кривые скорости тепловыделения для полипропилена (PP) и его композитов с УНТ и декорированными УНТ. Кроме того, были проведены контрольные измерения для композита полипропилена с механической смесью УНТ и фуллеренов.

ПерсТ, 2009, том 16, выпуск 24

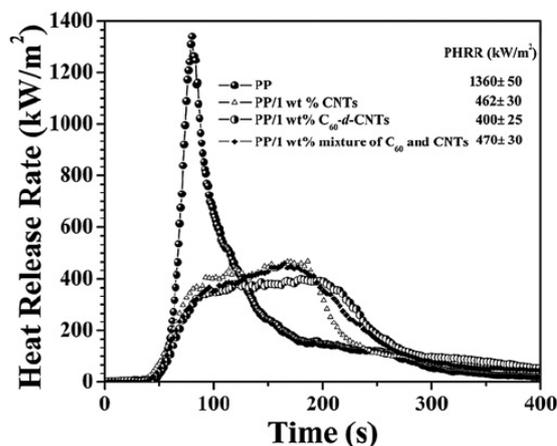


Рис.5. Скорость тепловыделения для полипропилена и его композитов с 1 масс.% УНТ или декорированных УНТ.

Видно, что внедрение 1 масс.% нанотрубок заметно (на 66%) снижает максимум скорости тепловыделения (PHRR – peak heat release rate). Добавки C₆₀-d-CNTs в том же количестве не только дополнительно уменьшают PHRR, но и замедляют процесс горения, то есть обеспечивают лучшую огнезащиту для полипропилена, чем исходные нанотрубки. В контрольных экспериментах, когда в полипропилен вводили механическую смесь УНТ и фуллеренов, максимум скорости тепловыделения был выше. Таким образом, эффективность не обусловлена простой комбинацией нанотрубок и фуллеренов. В настоящее время авторы продолжают исследования и в ближайшее время надеются опубликовать свои выводы относительно механизма огнезащиты.

О.Алексеева

1. <http://www.baynews.bayer.de/baynews/baynews.nsf/id/09534F7397A9686EC125767400500F5B>
2. A.J.Lecloux, F.Luizi, 3rd Annual Nanotechnology Safety for Success Dialogue, Brussels, 3-4 November 2009; http://ec.europa.eu/health/ph_risk/documents/ev_20091103_co11_en.pdf
3. P.Song et al., *Nanoscale* 1, 118 (2009).

СПИНТРОНИКА

Тепло, еще теплее...

Спинтроника рождалась постепенно, и, хотя это произошло недавно, проследить ее истоки достаточно сложно. Во всяком случае, в 70-е, когда по России и Франции прокатилась интенсивнейшая волна экспериментальных и теоретических исследований спиновых явлений [1], слово “спинтроника” еще не существовало. И хотя во французском комедийном романе “Литератрон” [2] окончание “...трон” приделывалось почти ко всем мыслимым существительным, преобразовывать слова в женский род не догадались, несмотря на числящееся за французами легкомыслие.

В достаточно подробном современном обзоре по спинтронике [3] возникновение самого термина

“спинтроника” относят к 1996 г. Авторство слова приписывают S.A.Wolf’у, который этим удачным термином запустил первые исследовательские программы DARPA по спиновой тематике. (DARPA - агентство по оборонным исследованиям США, Defense Advanced Research Projects Agency). С тех пор спинтроника – достойный раздел физики конденсированного состояния, представленный на полупроводниковых и магнитных конференциях, и, одновременно, источник надежды для тех, кто близко и всерьез воспринимает естественные ограничения электроники традиционной. Так что и здесь вначале было слово.

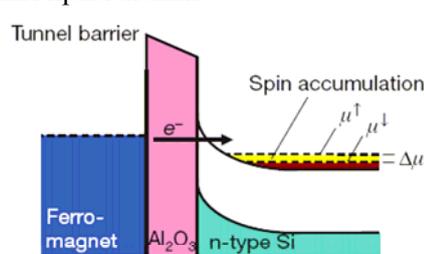
В обсуждаемой работе [4] новых слов не придумано. Работа интересна именно как продвижение спинтроники в практику, как шаг на пути превращения красивой области науки в нечто практически полезное. При этом авторы работы [4] попытались продвинуться сразу по двум критически важным направлениям.

Во-первых, они оставили в стороне материалы экзотические и даже не очень экзотические, и остановились на кремнии. Почему – вопрос отдельный. Вся современная электроника, за исключением фотоники и некоторых специальных устройств, сделана на кремнии. Кроме того, у кремния слабое спин-орбитальное взаимодействие, что приводит к большим временам существования электронного спина. Представляется, однако, что второй аргумент не основной. Малое спин-орбитальное взаимодействие действительно увеличивает время жизни спина, но в той же мере затрудняет управление им и его детектирование. Скорее, кремний выбран из-за необходимости в конечном итоге подстроиться под уже существующие технологии, чтобы была возможность вписаться в мировую электронную индустрию. Последние аргументы более существенны, хотя, возможно, не столь возвышенны и наукообразны.

Во-вторых, спинтронике нужно научиться работать при комнатных температурах. При низких температурах существует много удивительного и потенциально полезного, та же сверхпроводимость, например. В свое время, в 60-70 годы лозунг “... еще теплее” был актуален именно по отношению к сверхпроводящим материалам, и подъем T_c на каждую десятую градуса был интернациональным праздником в мире науки. 80-е подарили высокотемпературную сверхпроводимость, температура перехода забралась выше 100К. И что? Кто-нибудь уже видел поезд на сверхпроводящей подвеске, которые не будут разбивать рельсовый путь и ездить почти без затрат энергии? Увы, трезвая экономика не принимает чудес. Нужна комнатная температура.

В обсуждаемой работе [4] авторы сознательно ограничились комнатной температурой. При этом были успешно реализованы все три необходимые для спинтроники стадии работы: 1) инжекция спин-поляризованных электронов из ферромагнитного

контакта в кремний, 2) управление спиновым током, 3) измерение спинового тока. Успеху во многом способствовало использование туннельного барьера из Al_2O_3 между ферромагнетиком и кремнием (см.рис.). Помимо высокой рабочей температуры, в [4] впервые осуществлена инжекция спинов в кремний как n -типа, так и p -типа. При этом степень спиновой поляризации достигала 4.6% (в предыдущих работах – намного меньше 1%). Длина спиновой диффузии составила 310 нм для электронов и 230 нм для дырок, что уже достаточно для конкретных применений.



Профиль энергетических зон в кремнии n -типа вблизи границы с ферромагнитным контактом.

Правда, хотелось бы предостеречь от избыточного оптимизма. Сигнал от рекордного количества накопленных спинов составил всего 1.4мВ, что явно недостаточно для приборных применений, да и то, для того, чтобы этот сигнал выделить, нужно приложить к образцу внешнее магнитное поле порядка 0.1 Тл.

Так что основная идея статьи [4] вполне укладывается в каноническую формулировку детской игры, когда окружающие хором комментируют постепенное приближение к цели одного из играющих “...тепло...еще теплее...”. Интересно, что в данном случае формулировка подходит буквально – именно достижение более высоких температур и есть основной положительный результат обсуждаемой работы. Но как знать, может в этом небольшом достижении и есть залог того, что спинтроника когда-нибудь выйдет за пределы игры.

М.Компан

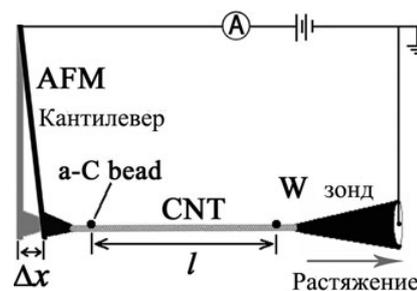
1. F.Meier, B.P. Zakharchenya, eds. “Optical Orientation” (North-Holland, New York, 1984).
2. Р.Эскалли “Литератрон” (Молодая гвардия, М., 1966).
3. I.Zutic et al., Rev. Mod. Phys. 76, 323 (2004).
4. S.P.Dash et al., Nature 462, 491 (2009).

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

Измерение механических характеристик двух- и трехслойных углеродных нанотрубок и жгутов

Согласно многочисленным измерениям и расчетам, модуль Юнга однослойных УНТ превышает терапаскаль (10^{12} Па), что в первую очередь связано с их бездефектной структурой. Соответствующие параметры многослойных УНТ на 1-2 порядка величины ниже, что обусловлено возможностью скольжения соседних слоев нанотрубки относительно

друг друга при растяжении. В связи с таким различием механических свойств однослойных и многослойных УНТ интересно проследить экспериментально зависимость указанных параметров от числа слоев в нанотрубке, с тем чтобы определить, начиная с какого числа слоев происходит резкое снижение механической прочности УНТ. Такие измерения были выполнены недавно группой сотрудников Peking Univ. (Китай), которые использовали в качестве объекта измерения двух- и трехслойные УНТ, а также жгуты, составленные из таких нанотрубок. Нанотрубки выращивали методом CVD разложением CH_4 при температуре 960°C с использованием катализатора на основе железа. УНТ выращивали в виде мостика, перекрывающего продольное углубление на подложке SiO_2/Si . Один из концов нанотрубки в результате электронного облучения прикреплялся к вольфрамовому зонду, после чего нанотрубку снимали с подложки и таким же образом прикрепляли другим концом к кантилеверу атомно-силового микроскопа. Схема измерения механических характеристик нанотрубки показана на рисунке.



Растягивающее усилие, накладываемое на зонд, передавалось кантилеверу, конец которого смещался на расстояние Δx , зависящее от упругих свойств как нанотрубки, так и кантилевера. Обработка зависимостей величины растяжения от приложенного усилия, а также измерение критического усилия и растяжения, соответствующих разрушению нанотрубки, позволили получить данные о механических свойствах двух- (ДУНТ) и трехслойных (ТУНТ) нанотрубок, а также жгутов, состоящих из двух двухслойных УНТ (2ДУНТ). Результаты измерений суммированы в таблице.

| № образца | Тип УНТ | Длина, мкм | Диаметр, нм | Модуль Юнга, ГПа | Предельное растяжение, % | Прочность на разрыв, ГПа |
|-----------|---------|------------|-------------|------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1 | ДУНТ | 3.19 | 1.8 | 0.73 ± 0.07 | 4.4 ± 0.03 | 31 ± 4 |
| 2 | ДУНТ | 4.20 | 2.7 | 1.25 ± 0.13 | $>(1.5 \pm 0.02)$ | $>(17 \pm 3)$ |
| 3 | ДУНТ | 2.63 | 2.7 | 1.15 ± 0.06 | $>(1.5 \pm 0.02)$ | $>(17 \pm 1)$ |
| 4 | ДУНТ | 2.12 | 3.0 | 0.75 ± 0.04 | 2.8 ± 0.02 | 20 ± 5 |
| 5 | ТУНТ | 2.73 | 2.4 | 0.83 ± 0.08 | 1.5 ± 0.02 | 20 ± 5 |
| 6 | ТУНТ | 3.11 | 2.7 | 0.90 ± 0.08 | 2.3 ± 0.2 | 13 ± 1 |
| 7 | ТУНТ | 6.96 | 2.8 | 1.33 ± 0.15 | $>(0.9 \pm 0.01)$ | 21 ± 3 |
| 8 | ТУНТ | 7.17 | 2.8 | 0.93 ± 0.02 | 4.9 ± 0.1 | $>(13 \pm 1)$ |
| 9 | 2ДУНТ | 5.48 | 3.2 | 1.10 ± 0.04 | $>(2.4 \pm 0.02)$ | 46 ± 6 |
| 10 | 2ДУНТ | 5.49 | 2.4 | 1.71 ± 0.17 | 1.6 ± 0.2 | $>(28 \pm 4)$ |
| 11 | 2ДУНТ | 3.84 | 2.5; 3.0 | 1.17 ± 0.06 | 3.9 ± 0.3 | 43 ± 5 |

Как следует из анализа представленных в таблице данных, величина модуля Юнга исследованных УНТ составляет порядка ТПа, что соответствует результатам ранних измерений и модельных расчетов для однослойных УНТ. Однако, измеренные величины предельного растяжения ϵ , при которых происходит разрушение нанотрубки, и величина прочности на разрыв σ оказались в несколько раз ниже результатов последовательных квантомеханических расчетов, согласно которым величина ϵ находится в диапазоне 10-30 %, а σ превышает 100 ГПа. Такое несоответствие может быть приписано наличию структурных дефектов, которые присущи нанотрубкам, синтезированным с использованием CVD метода.

А.Елецкий

I. X. Wei et al., J. Phys. Chem. C 113, 17002 (2009).

Влияние полярности электрического поля на рост вертикально ориентированных углеродных нанотрубок

Одно из наиболее перспективных направлений использования углеродных нанотрубок (УНТ) связано с разработкой холодных полевых эмиттеров на их основе. Уникальные особенности таких систем обусловлены высоким аспектным отношением нанотрубок, благодаря которому напряженность электрического поля в окрестности наконечника нанотрубки может в сотни раз превышать соответствующую среднюю величину этого параметра в межэлектродном промежутке. Тем самым использование УНТ в качестве основы холодных полевых катодов позволяет существенно снизить величину приложенного напряжения в таких системах, что существенно расширяет область их возможного применения. Среди технических трудностей, возникающих

на этом пути, следует в первую очередь упомянуть проблему создания массива вертикально ориентированных равноотстоящих УНТ одинаковой структуры. Решению этой проблемы способствует использование постоянного электрического поля, направление которого совпадает с направлением роста УНТ. Принято считать, что преимущественному росту УНТ в направлении поля способствует их поляризация. Это связано с притяжением, которое характеризует взаимодействие между дипольным моментом нанотрубки и наведенным диполем нейтральных атомов, окружающих эту поверхность в процессе роста УНТ. Однако, как следует из результатов эксперимента, выполненного в Univ. of Nebraska-Lincoln (США) [1], влияние электрического поля на ориентацию УНТ имеет более сложный характер. На это, в частности, указывает установленная авторами зависимость степени ориентации УНТ от полярности приложенного поля, которая не должна наблюдаться при чисто электростатическом взаимодействии нанотрубки и атома. УНТ выращивали на подложке Si/SiO₂ методом осаждения паров с лазерным стимулированием (LCVD). В качестве электродов использовали структурированную пленку рутения толщиной 180 нм, которую напыляли на подложку с помощью фотолитографии. На Ru электроды наносили трехслойную пленку Al/Fe/Al (2.1.1 нм), которая служила катализатором. Преимущества использования электродов из рутения связаны с высокими работой выхода и температурой плавления этого металла, а также с его низкой растворимостью в железе.

Процесс роста УНТ проводили при температуре 500 ± 20°C под облучением CO₂-лазера непрерывного действия в потоке C₂H₂ +NH₃ в отношении 1:10 при полном давлении 10 Торр. Длительность роста составляла 1.5 мин. С целью получения вертикально ориентированных УНТ на электроды подавали постоянное напряжение различной полярности. Полученные УНТ исследовали с помощью полевого эмиссионного сканирующего электронного микроскопа, а также КР спектрометра, имеющего пространственное разрешение 2 мкм. Исследования

показали, что на катоде росли вертикально ориентированные нанотрубки, в то время как УНТ, выращенные на аноде, стелились по его поверхности.

В качестве механизма вертикального выстраивания УНТ перпендикулярно поверхности катода авторы рассматривают отрицательный заряд на частицах катализатора, обусловленный различием в работах выхода электрона для УНТ и железа. Отрицательно заряженная частица катализатора, подверженная влиянию электрического поля, оказывает ориентирующее воздействие на растущую нанотрубку. В случае нанотрубки, растущей от анода, указанное воздействие имеет противоположный знак и не способствует вертикальной ориентации УНТ.

А.Елецкий

I. Y.Gao et al., Appl. Phys. Lett. 95, 143117 (2009).

ТОРЖЕСТВО

23 декабря 2009 г. Институт физических проблем им. П.Л.Капицы отметил свой **75-летний юбилей!**

Поздравляем коллектив ИФП РАН со славною годовщиной! Творческих успехов, новых свершений и открытий!

Дорогие наши Читатели!



Казалось, что совсем недавно мы встречали 2000 год!

Сколько было волнений: на пороге XXI Век!

И вот уже вместо двух нулей на календаре цифра 10.

Как быстро бежит время...

Пусть две тысячи десятый год будет щедрым на события и открытия.

Пусть будет ярким и красивым, и пусть принесет в каждый дом счастье, радость и успех!

Редакция и авторы ПерсТa

Экспресс-бюллетень ПерсТ издаётся совместной информационной группой ИФТТ РАН и РИЦ «Курчатовский институт»

Ответственный редактор: И.Чугуева, e-mail: irina@issp.ras.ru

Научные редакторы К.Кугель, Ю.Метлин

В подготовке выпуска принимали участие: О.Алексеева, В.Вьюрков, А.Елецкий,

М.Компан, М.Маслов, Л.Опенев, А.Пятаков

Компьютерный ввод, макет: И.Фурлетова

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