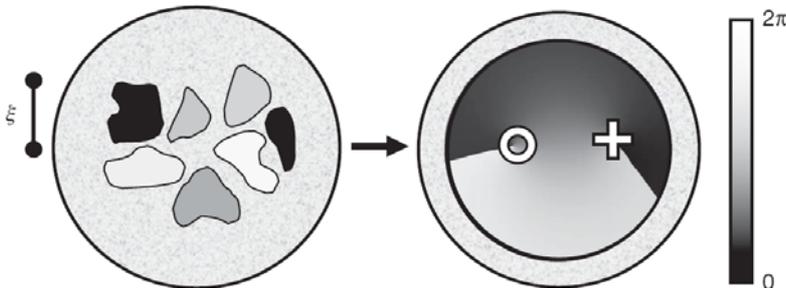


В этом выпуске:

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

Топологические дефекты в космосе и на Земле

Принято считать, что многие (или даже большинство) непрерывные фазовые переходы сопровождаются спонтанным формированием топологических дефектов – специфических устойчивых конфигураций вещества. Согласно одной из гипотез [1], во время одного из таких переходов, который произошел с нашей Вселенной спустя $\sim 10^{-35}$ секунды после Большого Взрыва при ее охлаждении вследствие быстрого расширения, тоже возникли топологические дефекты (“космические струны”). Наличие этих дефектов, сохранившихся и после перехода, привело к образованию во Вселенной макроструктур – галактик и их скоплений. Причина сохранения топологических дефектов заключалась в том, что каждый из них формировался локально за время, меньшее, чем время распространения света от одного дефекта до другого. Иными словами, в процессе своего рождения дефекты “ничего не знали” друг о друге. В конденсированных средах большая скорость возникновения топологических дефектов существенно осложняет экспериментальные исследования их микроскопической динамики при фазовых переходах (например, при переходе в сверхтекучее состояние).



Спонтанное формирование вихрей при бозе-эйнштейновской конденсации. Слева: образование изолированных друг от друга когерентных областей (мини-конденсатов) с размерами порядка длины когерентности ξ и случайными фазами. Справа: при слиянии мини-конденсатов в единый бозе-конденсат образуются топологические дефекты – вихри (крест) и антивихри (круг).

В работе [2] сотрудники University of Arizona (США) и University of Queensland (Австралия) сообщили о результатах, полученных ими при исследовании бозе-конденсации атомов ^{87}Rb в магнитной ловушке. Они обнаружили такой режим конденсации, при котором несколько различных (то есть имеющих различные фазы) “мини-конденсатов” зарождаются в разных частях ловушки. Технически это оказалось возможным благодаря тому, что в конденсированных средах обмен информацией между частями одной системы осуществляется за счет не световых (как во Вселенной), а гораздо более медленных звуковых волн. Когда три таких мини-конденсата сливаются воедино, они образуют топологический дефект – вихрь или антивихрь (см. рис.). Поскольку все фазовые переходы можно разбить на подчиняющиеся общим закономерностям (независимо от их конкретной природы) универсальные классы, то детальные исследования какого-то одного перехода автоматически дает ин-

И далее ...

СВЕРХПРОВОДНИКИ

- 2 Сильные корреляции – причина устойчивости ВТСП к беспорядку

Высокотемпературная сверхпроводимость границы раздела между металлом и диэлектриком

- 3 Квантовые осцилляции в передопробированном высокотемпературном сверхпроводнике

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОЭЛЕКТРОНИКА

- 3 Длинные нанотрубки опасны так же, как асбест?

МАГНИТЫ

- 6 Как электронная бумага стала магнитной

СПИНТРОНИКА

- 7 Спиновый эффект Зеебека

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

- 7 Нарушение закона Фурье в случае теплопроводности нанотрубок

- 8 Получение массивов углеродных нанотрубок миллиметровой длины

ФИНАНСИРОВАНИЕ И РЫНОК

- 9 Римская колесница и наностандарты

КОНФЕРЕНЦИИ

- 10 90-лет журнала УФН

Научная сессия ОФН РАН

формацию и о других переходах того же класса. Таким образом, у нас, в частности, появляется уникальная возможность поприисутствовать если и не при зачатии, то хотя бы при рождении нашей Вселенной, не выходя при этом из лаборатории. И никакие большие (даже Очень Большие) коллайдеры здесь не требуются.

1. T.W.B.Kibble, *J. Phys. A* **9**, 1387 (1976).
2. C.N.Weiler et al., *Nature* **455**, 948 (2008).

СВЕРХПРОВОДНИКИ

Сильные корреляции – причина устойчивости ВТСП к беспорядку

Сильное межэлектронное взаимодействие играет центральную роль в высокотемпературных сверхпроводниках [1]. Оно ответственно как за моттовское диэлектрическое состояние родительских соединений, так и за *d*-волновое сверхпроводящее состояние, формирующееся при допировании моттовского диэлектрика. Эксперимент свидетельствует о том, что высокотемпературная сверхпроводимость нечувствительна (или очень слабо чувствительна) к структурному беспорядку [2], тогда как стандартная БКШ-подобная теория предсказывает обратное [3]: *d*-волновое спаривание должно быстро подавляться как немагнитными, так и магнитными примесями или дефектами [4].

В работе [5] теория сверхпроводимости допированного моттовского диэлектрика обобщена на случай наличия в нем хаотически распределенных примесей. Показано, что электронные корреляции обеспечивают устойчивость сверхпроводимости к разупорядочению. Это связано, в первую очередь, с “экранировкой” беспорядка межэлектронным взаимодействием, в результате чего локальное нарушение сверхпроводящего порядка “залечивается” на гораздо более коротких расстояниях от примеси, чем в отсутствие таких взаимодействий. Полученные в [5] результаты позволяют объяснить данные многочисленных экспериментальных исследований дефектных ВТСП методами сканирующей туннельной спектроскопии и фотоэмиссии с угловым разрешением.

Л.Опенев

1. P.A.Lee et al., *Rev. Mod. Phys.* **78**, 17 (2006).
2. H.Alloul et al., <http://arxiv.org/abs/0711.0877> (2007).
3. А.А.Абрикосов, Л.П.Горьков, *ЖЭТФ* **39**, 1781 (1960).
4. L.A.Openov, *Phys. Rev. B* **58**, 9468 (1998).
5. A.Garg et al., *Nature Phys.* **4**, 762 (2008).

Высокотемпературная сверхпроводимость границы раздела между металлом и диэлектриком

При стандартных экспериментальных исследованиях квазидвумерной сверхпроводимости обычно используются ультратонкие (толщиной $N = 1 - 2$ эле-

ментарные ячейки) слои сверхпроводящих материалов. Альтернативный подход основан на изучении границ раздела между различными (причем не обязательно сверхпроводящими!) материалами. Так была открыта сверхпроводимость границы раздела между двумя диэлектрическими оксидами [1], пусть и с небольшой критической температурой T_c .

В работе [2] группа американских ученых под руководством I.Vozovic’a представила результаты детальных исследований сверхпроводимости большого количества (> 200) однофазных, двухслойных и трехслойных пленок, полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии и представляющих собой комбинации диэлектрических (La_2CuO_4 , *I*), металлических ($\text{La}_{1.55}\text{Sr}_{0.45}\text{CuO}_4$, *M*) и сверхпроводящих ($\text{La}_2\text{CuO}_{4+\delta}$, *S*) слоев, имеющих различную толщину и осажденных в различной последовательности на подложки LaSrAlO_4 . Как видно из рис.1, двухслойные пленки *I-M* и *M-I* (слои указаны в порядке их осаждения на подложку) являются сверхпроводниками с $T_c \approx 15$ К и $T_c \approx 30$ К соответственно, а максимальная $T_c \approx 50$ К пленок *M-S* оказывается на 25% больше величины $T_c \approx 40$ К однофазных сверхпроводящих пленок (равно как и монокристаллов этого сверхпроводника). Увеличение толщины верхнего слоя *N* приводит к монотонному росту величины T_c и ее выходу на константу при $N \geq 2$ элементарных ячеек. Это определяет характерный масштаб для сверхпроводимости границ раздела.

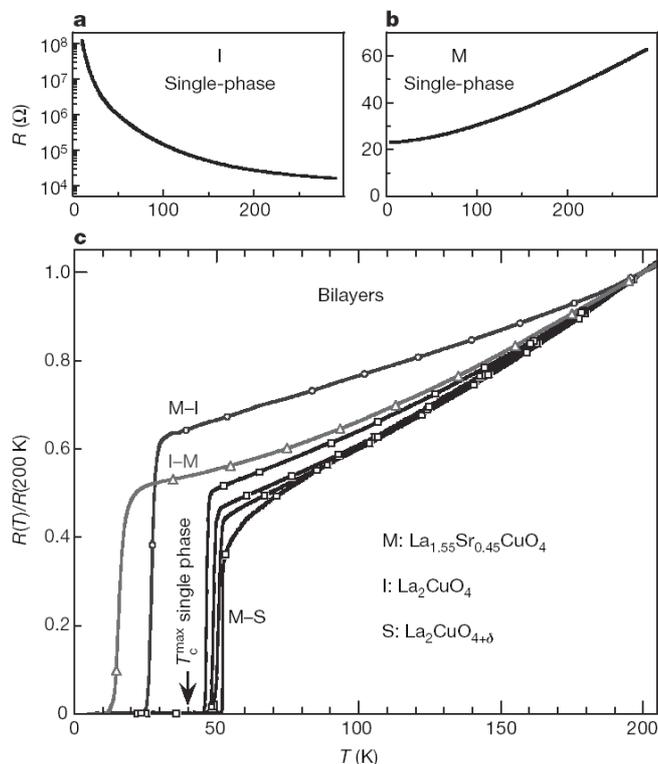


Рис.1. Температурные зависимости сопротивления однофазных диэлектрических (*I*), металлических (*M*) и сверхпроводящих (*S*) пленок, а также двухслойных пленок *I-M*, *M-I* и *M-S*.

Авторы [2] рассматривают несколько возможных причин обнаруженного ими эффекта. В том числе,

они не исключают, что в двухслойных пленках имеет место подавление некоего гипотетического несверхпроводящего порядка, который, конкурируя в объемных металлических и диэлектрических образцах со сверхпроводящим порядком, препятствует их сверхпроводимости. Более простое (и в то же время красивое) объяснение эксперимента предложено в работе [3], где замечено, что обычное электростатическое взаимодействие между дырками и ионизированными примесями приводит к такому перераспределению дырок между слоями, что их концентрация может оказаться оптимальной (отвечающей максимуму T_c) именно в ближайшем к границе раздела слое элементарных ячеек, стремясь при удалении от него (по обе стороны от этой границы) к величинам либо намного большим, либо намного меньшим оптимальной концентрации.

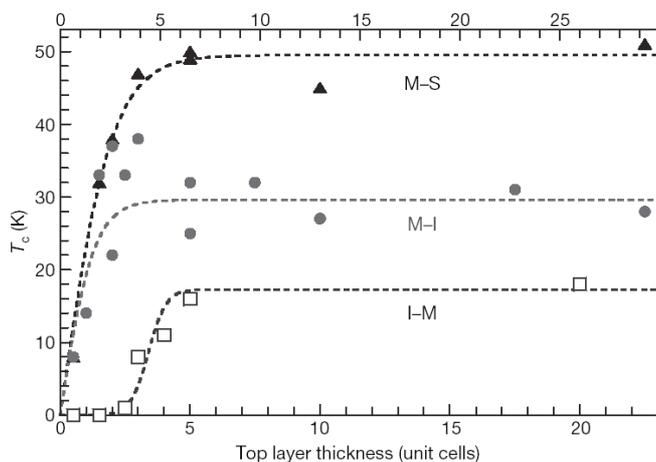


Рис.2. Зависимости критической температуры T_c двухслойных пленок $I-M$, $M-I$ и $M-S$ от толщины верхнего слоя (в элементарных ячейках). Толщина нижнего слоя в каждом случае фиксирована (40 элементарных ячеек).

Л. Опенов

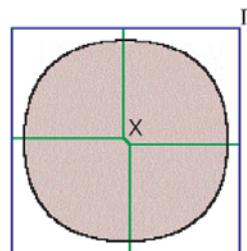
1. N.Reyren et al., *Science* **317**, 1196 (2007).
2. A.Gozar et al., *Nature* **455**, 782 (2008).
3. V.Loktev, Yu.Pogorelov, *Phys. Rev. B* **78**, 180501 (2008).

Квантовые осцилляции в передопированном высокотемпературном сверхпроводнике

Пока нет окончательного ответа на вопрос о природе металлического состояния передопированных ВТСП и о характере его изменения при уменьшении концентрации дырок (p). Эксперименты по угловой зависимости магнитосопротивления (angle-dependent magnetoresistance, ADMR) [1] и фотоэмиссионной спектроскопии с угловым разрешением (ARPES) [2] вроде бы свидетельствуют о наличии в передопированных ВТСП большой сплошной поверхности Ферми, но еще не ясно, при какой величине p псевдощель полностью исчезает. Так как ADMR представляет собой полуклассический эффект, на его основе нельзя сделать однозначный вывод о квантовой природе основного электронного состояния. Что касается ARPES, ее качество (особенно вблизи границ зон Бриллюэна) оставляет

желать лучшего, что не позволяет с уверенностью судить о наличии или отсутствии на поверхности Ферми долгоживущих фермиевских квазичастиц, предсказываемых теоретиками на основе расчетов в рамках теории функционала плотности (DFT).

В работе [3] французские и английские физики исследовали эффект де Гааза – ван Альфена (dHvA) – осцилляции намагниченности, возникающие из-за квантования энергетических уровней квазичастиц в сильном магнитном поле. Так как обязательным условием для эффекта dHvA является сохранение когерентности волновой функции квазичастицы в течение всего времени ее движения по лежащей на поверхности Ферми замкнутой орбите, то наблюдение квантовых осцилляций можно считать неоспоримым доказательством существования когерентной поверхности Ферми. И такие осцилляции действительно были обнаружены в передопированных образцах ВТСП $Tl_2Ca_2CuO_{6+\delta}$, представлявших собой монокристаллы с размерами $0.2 \times 0.1 \times 0.02$ мм³ и $T_c = 15$ К [3]. Когерентными являются даже состояния вблизи границ зоны Бриллюэна, для которых в недодопированных образцах псевдощель максимальна, а межэлектронные взаимодействия самые сильные. Поверхность (контур) Ферми является сплошной и занимает около двух третей зоны Бриллюэна (см. рис.). Полученные в [3] результаты полностью согласуются с данными ADMR.



$$F = 18,100 \pm 50 \text{ Т}$$

Поверхность Ферми в передопированном ВТСП Tl_2201 с $T_c = 15$ К.

Таким образом, теория ферми-жидкости применима к описанию электронной структуры передопированных ВТСП. Что происходит с поверхностью Ферми при уменьшении концентрации дырок? Разбивается ли она на не связанные друг с другом дуги или эволюционирует в совокупность небольших “пакетов”? Начиная с какой концентрации носителей теория ферми-жидкости перестает работать (и перестает ли?). Со всем этим еще предстоит разобраться.

Л. Опенов

1. N.E.Hussey et al., *Nature* **425**, 814 (2003).
2. M.Platt et al., *Phys. Rev. Lett.* **95**, 077001 (2005).
3. B.Vignolle et al., *Nature* **455**, 952 (2008).

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Длинные нанотрубки опасны так же, как асбест?

Сходство углеродных нанотрубок (УНТ) и асбестовых волокон обсуждается учеными уже в течение ряда лет (см., например, [1]). Это связано с вредным воздействием асбеста* на здоровье, обнаруженным в начале 1970-ых г.г. Выяснилось, например, что

длительные контакты с асбестом могут через много лет вызвать в мезотелии** легких злокачественную опухоль мезотелиому. Использование асбоцемента и других продуктов из асбеста в ряде стран было запрещено. Не удивительно, что опубликование новых экспериментальных данных, полученных при сравнительном изучении воздействия УНТ и асбеста, вызвало оживленные дискуссии и комментарии не только в среде ученых, но и со стороны производителей нанотрубок. Речь идет об исследованиях, проведенных в Эдинбургском университете (Великобритании) [2] и в Японии [3].

Токсикологи считают опасными волокна тоньше 3 мкм, длиннее ~ 20 мкм и биостойкие в легких (то есть те, которые не растворяются и не распадаются на короткие волокна). Таким образом, опасными могут быть и многостенные углеродные нанотрубки. В обоих исследованиях в брюшную полость мышей вводились суспензии многостенных углеродных нанотрубок (МСНТ) разной длины и волокон асбеста для сравнения.

В работе [2] было изучено 4 образца коммерческих МСНТ, два из которых представляли собой агломераты коротких спутанных нанотрубок, а два другие содержали достаточное количество длинных (более 20 мкм) прямых нанотрубок:

- 1) сферические агломераты плотноупакованных нанотрубок длиной 1-5 мкм (Nanolab, Inc.);
- 2) агломераты из спутанных нанотрубок длиной ~ 5 мкм, некоторая часть – средней (до 20 мкм) длины (Nanolab, Inc.);
- 3) длинные прямые нанотрубки 10-20 мкм, около 12% имеют длину более 20 мкм (Mitsui&Co);
- 4) длинные прямые нанотрубки длиной более 20 мкм, максимальная длина 56 мкм (University of Manchester).

Ранее авторы [2] обнаружили вредное воздействие на мезотелий длинных волокон асбеста амозита и отсутствие эффекта от коротких волокон при внутрибрюшинной инъекции, поэтому в их новой работе волокна амозита были использованы как контрольные образцы. Короткие волокна были получены измельчением в шаровой мельнице. Наноразмерные частицы сажи использовались как контрольный образец неволоконистого углерода.

Каждый образец материала в дозе 50 мкг вводили в брюшную полость мыши. Только два образца длинных МСНТ и длинные волокна асбеста вызвали воспалительные отклики и образование гранулем. Это обычная реакция на инородные тела, с которыми из-за их большой длины не справляются фагоциты*** (рис. 1). Считается, что фагоциты не в состоянии поглотить волокна длиннее 20 мкм, и так называемый «фрустрированный фагоцитоз» приводит к воспалениям (и со временем к опухолям). В работе [2] образование мезотелиомы через 7 дней после эксперимента не наблюдалось (это слишком

малый срок), но произошедшие ранние изменения аналогичны тем, которые наблюдались при действии амозита и впоследствии приводили к этой злокачественной опухоли.

Авторы подчеркивают, что хотя их данные показали, что короткие МСНТ не ведут себя как волокна асбеста, это не означает, что они не опасны – они могут причинять вред как наночастицы (эти эффекты в работе не исследованы).

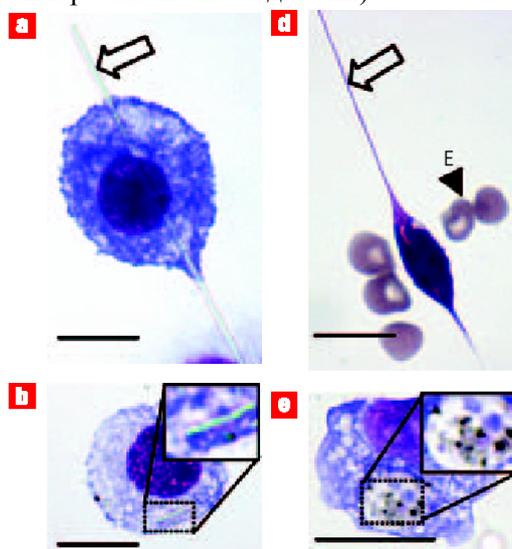


Рис.1 Влияние длины волокна на фагоцитоз: а) гистологический срез показывает, что внедрение длинного волокна асбеста (стрелка) приводит к фрустрированному фагоцитозу; б) успешный фагоцитоз коротких волокон асбеста (врезка); д) длинные нанотрубки (образец 4) действуют аналогично длинным волокнам асбеста; е) короткие УНТ (образец 1) успешно поглощены. Увеличение $\times 1000$, показан отрезок 5 мкм.

Схематично эксперимент, проведенный в работе [2] - фагоцитоз коротких спутанных и длинных прямых МСНТ - представлен на рис.2 [4].

К. Donaldson, (под руководством которого проводились исследования [2]), отметил, что, конечно, волокна асбеста попадают в легкие человека другим путем – при вдыхании. Однако на его взгляд мезотелий брюшины мыши идентичен мезотелию плевры, и поэтому эксперимент с инъекцией в брюшную полость мыши оправдан и является быстрым и легким способом проверки. Конечно, результат показывает лишь возможность воздействия. Надо определить точную минимальную дозу, минимальные размеры, при которых возможно вредное воздействие. И, конечно, проверить, что же на самом деле имеется в атмосфере на рабочих местах. Авторы рекомендуют проводить тщательные исследования до выпуска УНТ на рынок.

В японской работе [3] контрольным образцом служил асбест крокидолит (синий асбест), также известный своим вредным воздействием на человека. Результаты исследований показали, что длинные МСНТ (1-20 мкм) оказывают аналогичное действие и могут привести к мезотелиоме. Были использованы нанотрубки, производимые Mitsui & Co. (как и

один из образцов [2]), но эксперименты проводили не на обычных мышах, а на генетически модифицированных и чувствительных к воздействию асбеста. Вводимая доза во много раз больше, чем в [2] - 3 мг/мышь. Фиброз и гранулемы в мезотелии, а также образование опухоли наблюдались через 25 недель у 88% мышей, подвергшихся воздействию МСНТ, и у 79% - в случае использования асбестовых волокон. Аналогичная доза (по массе) фуллеренов C_{60} не вызвала вредных эффектов.

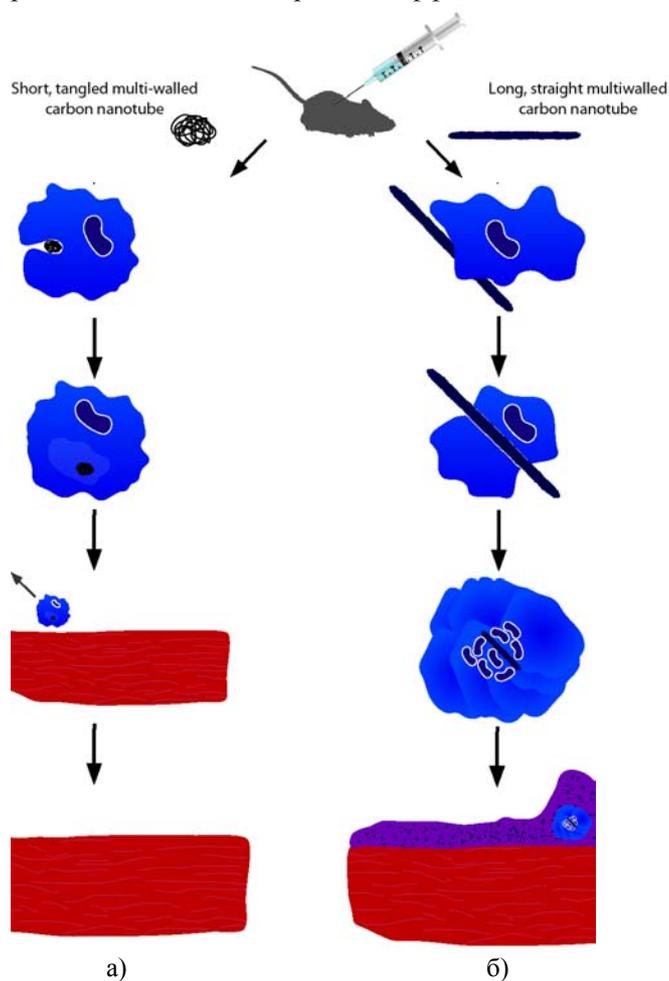


Рис.2. Схема эксперимента, проведенного в работе [2].
 а) Успешный фагоцитоз. Агломерат коротких МСНТ поглощен макрофагом (фагоцитом соединительной ткани) и удален через лимфатическую систему. Остается здоровая ткань.
 б) Фрустрированный фагоцитоз – нанотрубка слишком длинная. Несколько макрофагов в тщетной попытке удалить МСНТ объединяются вместе и образуют гигантскую клетку инородного тела, которая через некоторое время превращается в гранулему.

Наиболее смелые могут посмотреть анимацию этого эксперимента на сайте International council of nanotechnology [5]

Можно ли на основании этих результатов считать, что выявлена связь между длинными тонкими МСНТ и возникновением опухолей? И правы ли некоторые производители нанотрубок, которые считают, что все необходимые меры безопасности уже приняты, и риск подвергнуться воздействию нанотрубок при производстве или потреблении не-

значителен? Приведем некоторые из опубликованных на сайте ICON [4] комментариев.

S. Tsuruoka, ведущий специалист Mitsui & Co. Ltd., уверен, что риск вредного воздействия (аналогичного воздействию асбеста) от МСНТ, производимых Mitsui, крайне мал. Он сообщил, что Mitsui бесплатно предоставляет образцы своих МСНТ в разные страны для проверки их безопасности (материалы были использованы и в исследованиях [2,3]). Самая опасная стадия при производстве – перегрузка из реактора в контейнеры. На заводе установлены системы вентиляции, работники снабжены средствами индивидуальной защиты. Проверка, проведенная на заводе Японским институтом охраны окружающей среды, показала, что в атмосфере отсутствуют МСНТ. Кроме того, имеется документация для потребителей, рассказывающая о том, как надо обращаться с продуктами. Было продемонстрировано, что проникновение через кожу МСНТ производства Mitsui исключено.

G. Oberdörster, профессор Рочестерского университета (США), известный своими исследованиями в области нанотоксикологии (см., например, [6]), в комментариях к статьям отметил, что интерпретировать результаты японской работы [3] надо очень осторожно, в частности потому, что была введена чрезвычайно большая доза, МСНТ не были хорошо диспергированы, и по сути использовалась смесь очень крупных агломератов МСНТ и нескольких отдельных волокон. Результаты, полученные в [2], действительно показали, что МСНТ, имеющие достаточно большую длину, могут вызвать отклик, аналогичный асбестовым волокнам. Однако на основании кратковременных исследований нельзя судить о возможных отдаленных последствиях. Выводы авторов работ неувидительны – ведь токсичность и канцерогенность волокон определяется тремя основными факторами - тремя «Д» - *Дозой, Долговечностью, Длиной* (или немного точнее *Dose, Durability, Dimensions*). Главный вопрос заключается в том, что будет происходить при ингаляции *in vivo*. В целом обе статьи говорят о необходимости осторожного обращения с углеродными нанотрубками. Надо стараться избегать ингаляции и загрязнений кожи и одежды, как это было на начальном этапе работы с асбестом – работники приносили волокна на одежде домой. К сожалению, пока имеется мало конкретных данных. Необходимо объединить усилия ученых, чтобы узнать больше о возможных токсичных и канцерогенных эффектах и механизмах воздействия. У нанотрубок большой потенциал, но надо правильно оценить риски. Эти статьи должны послужить сигналом к действиям: для правительственных органов – это необходимость выделения ресурсов для оценки рисков на научной основе; для промышленности – разработка программ контроля за продукцией. Как считает G. Oberdörster, в реальном *in vivo* мире дозы, дости-

гающие мезотелия, на порядки величины меньше, чем в исследованиях [2, 3] (возможно, даже нулевые). Большие дозы, введенные мышам, действительно представляли опасность. К сожалению, отмечает он, люди путают понятия «опасность» и «риск». Часто публикуемые результаты исследований, демонстрирующие токсичность наноматериала (возможно даже при нереалистично большой дозе *in vitro*), наивно воспринимаются как доказательство высокого риска вреда для здоровья. Такое неверное понимание риска может действительно представлять опасность для будущего нанотехнологии.



* *Асбест* (от греч. «неугасимый») – собирательное название группы природных гидросиликатов с волокнистой структурой. Они легко расщепляются на тонкие прочные волокна

длиной до 20 мм, образуют устойчивые композиции с цементом, битумом, асфальтом и др. Выделяют две основные группы – серпентин (хризотил), или белый асбест, $(Mg_3)[Si_2O_5](OH)_3$ и амфиболы с более сложным химическим составом. Основной промышленный асбест хризотил применяется, например, в производстве панелей, шифера. Он был выбран для сравнения с УНТ в работе, обсуждаемой в [1]. Амфиболы применяются как наполнители красок, асбобластиков. Они использовались в экспериментах [2,3]: амосит или коричневый асбест – в [2] и крокидолит или синий асбест в – [3].

** Мезотелий - ткань, выстилающая внутренние поверхности грудной и брюшной полости и внешние поверхности находящихся в них органов

*** Фагоциты (от греч – *phagos* – пожиратель) – специализированные защитные клетки, способные к фагоцитозу, то есть активному захвату и поглощению микроскопических живых объектов и твердых частиц. Открытие фагоцитоза принадлежит И.И. Мечникову.

О.Алексеева

1. ПерсТ 12, вып. 4, с.3 (2005).
2. С.А.Poland et al. *Nature Nanotech.* 3, 423-428 (2008).
3. A.Takagi et al., *J. Toxicol. Sci.* 33, 105-116 (2008).
4. http://icon.rice.edu/resources.cfm?doc_id=12299
5. <http://icon.rice.edu/iconanimation.cfm>
6. ПерсТ 14, вып.19, с.2 (2007).

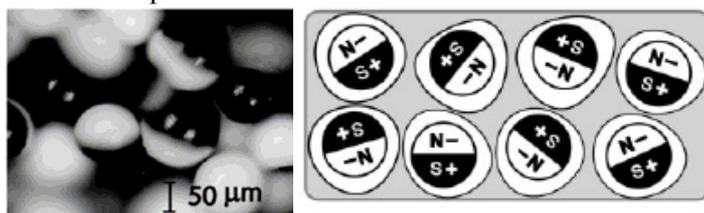
МАГНИТЫ

Как электронная бумага стала магнитной

Создавать магнитное поле с помощью электричества человечество научилось уже в начале 19-го века, а во второй его половине электромагниты уже применялись в промышленности повсеместно. Однако такой способ, связанный с протеканием электрических токов, энергозатратен по определению. Поэтому в конце 20-го века постоянные магниты, не требующие источников питания, стали снова привлекатель-

ной альтернативой (они используются, например, в драйверах жестких дисков, в электродвигателях и в акустических системах). Однако, как следует из самого названия, постоянные магниты не могут включаться и выключаться или менять полярность по нашему желанию. Поэтому задача о создании магнито-электрической среды, которая бы объединяла в себе достоинства энергонезависимых постоянных магнитов и переключаемых электромагнитов сейчас выходит на первый план. Любопытное решение этой задачи предложено сотрудниками Harvard University (США): придать магнитные свойства *гирикону*, среде, используемой в качестве электронной бумаги [1].

Гирикон представляет собой полимерную среду, в которую внедрены двуцветные сферические частицы из полиэтилена, свободно вращающиеся внутри полостей с жидкостью (рис.1). Две полусферы частицы отличаются не только цветом, но и электрическим зарядом – темная сторона заряжена положительно, так что вся частица имеет дипольный момент $\sim 10^{-19}$ Кл·м. Этого момента оказывается достаточно, чтобы ориентировать частицы с помощью электрического поля ~ 3 В/мкм. Переключая полярность приложенного напряжения, можно менять цвет поверхности полимерной пленки с черного на белый и обратно.



а)

б)

Рис. 1. а – микрофотография гирикона: полимера с внедренными черно-белыми сферическими частицами; б – схематическое изображение магнитоэлектрического композита на основе гирикона: частицы-диполи свободно вращаются в микрополостях с жидкостью. +/- электрические, S,N – магнитные полюса.

В [1] было предложено добавить к свойствам электронной бумаги еще одну функциональную возможность – магнитную, путем введения в материал частиц магнитных примесей. Чтобы задать магнитный момент, частицы подвергались одновременно воздействию электрического и магнитного полей: электрическое поле ориентировало частицы, а магнитное задавало постоянный магнитный момент. Так среда приобретала эффективные магнитоэлектрические свойства: теперь подачей электрического напряжения можно было управлять намагниченностью гирикона, не расходуя энергию на электрические токи.

Любопытно, что идея создания среды, состоящей из частиц со «сцепленными» магнитными и электрическими моментами, высказывалась еще в 1948 году классиком электроники и электротехники Б. Теллегеном [2], однако предлагаемый им рецепт –

суспензия из магнитных частиц, соединенных с частичками электрета, был трудно реализуем технически.

К сожалению, намагниченность среды очень невелика – несколько миллигаусс (правда, авторы обещают увеличение этой величины на порядки подбором магнитных примесей с большей намагниченностью насыщения). Быстродействие устройств на гириконе также оставляет желать лучшего. В силу того, что переключение осуществляется путем механического вращения частиц, частоты не превышают единиц Герц, так что о приложениях в твердотельной микроэлектронике речи не идет (в отличие от магнитоэлектриков, см. [3], и полупроводников, см. [4]). Зато магнитоэлектрический гирикон может оказаться полезным для приложений в микрофлюидике (раздел гидродинамики, занимающийся созданием «жидкостных роботов», автоматизирующих химические и биохимические работы), в микроэлектромеханических системах (MEMS) и в пластиковой микроэлектронике.

А. Пятаков

1. A.Ghosh et al, *Small* 4, 1958 (2008).
2. B.D.H. Tellegen, *Philips Res. Rep.* 3, 81 (1948).
3. *ПерсТ* 15, вып. 9, стр. 4 (2008).
4. *ПерсТ* 8, вып. 19, стр.3 (2001).

СПИНТРОНИКА

Спиновый эффект Зеебека

Наличие в металлическом проводнике градиента температуры приводит к возникновению в нем электрического напряжения V . Это явление называется эффектом Зеебека. Количественно оно характеризуется коэффициентом Зеебека S , равным отношению V к перепаду температур T_1-T_2 . Коэффициент Зеебека зависит от концентрации свободных электронов и времени их свободного пробега. Эффект Зеебека используется, например, в термопаре, которая состоит из двух проводников с разной величиной S и служит для измерения температуры (рис. 1а), а также в генераторах электричества на искусственных спутниках Земли.

В работе [1] японские физики сообщили о наблюдении спинового эффекта Зеебека (рис. 1b). В ферромагнитном металле концентрации электронов с разными направлениями спина резко различаются. При наличии градиента температуры соответствующие химические потенциалы становятся разными, возникает так называемое «спиновое напряжение» и течет «спиновый ток». Для экспериментальной демонстрации этого эффекта авторы [1] использовали двухслойную структуру $Ni_{81}Fe_{19}/Pt$. При комнатной температуре им удалось добиться протекания спинового тока на макроскопических расстояниях ~ 1 см, что на три порядка больше, чем в предыдущих экспериментах. Полученные в [1] результаты – существенный шаг к действующим спинтронным приборам.

ПерсТ, 2008, том 15, выпуск 21

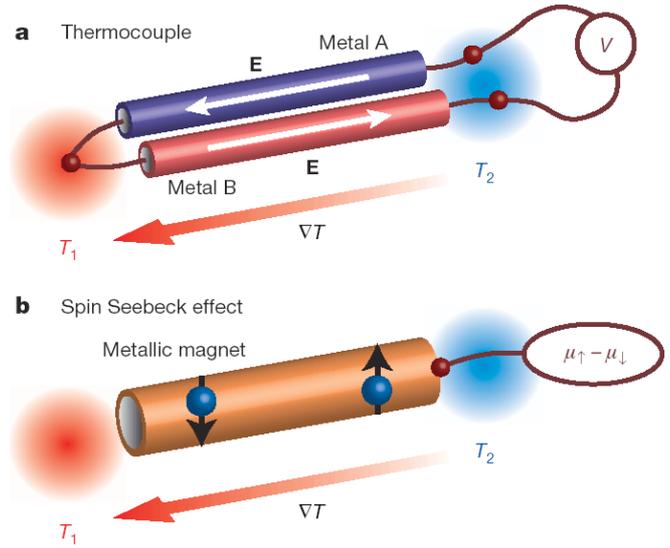


Рис.1. (а) Термопара состоит из двух металлических проводников с разными коэффициентами Зеебека.

(b) Иллюстрация спинового эффекта Зеебека. В магнитном металле коэффициенты Зеебека для электронов со «спином вверх» (\uparrow) и «спином вниз» (\downarrow) не равны друг другу, поэтому при наличии градиента температур возникает «спиновое напряжение» – разность химических потенциалов $\mu_{\uparrow}-\mu_{\downarrow}$. Под его воздействием по образцу течет спиновый ток.

I. K.Uchida et al., *Nature* 455, 778 (2008).

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

Нарушение закона Фурье в случае теплопроводности нанотрубок

По аналогии с законом Ома для электропроводности проводящих материалов закон Фурье для теплопроводности является эмпирическим правилом, согласно которому коэффициент удельной теплопроводности (thermal conductivity) образца не зависит от его размеров, в то время как проводимость (thermal conductance) обратно пропорциональна его продольному размеру. В случае одномерных материалов, типичным представителем которых является углеродная нанотрубка (УНТ), указанная закономерность может нарушаться, что связано с возможным вкладом в перенос тепла фононного баллистического механизма. Хотя понимание причины такого нарушения было достигнуто уже несколько лет назад, до сих пор не было получено экспериментальное доказательство отклонения от закона Фурье в конкретных условиях. Прямой эксперимент подобного рода был поставлен недавно в University of California, Berkeley (США). В эксперименте использовали многослойные УНТ диаметром от 10 до 33 нм, полученные стандартным электродуговым методом, а также нанотрубки из нитрида бора (НТНБ) длиной до 10 мкм и диаметром 30–40 нм. Отдельную нанотрубку помещали с помощью пьезоманипулятора в тестовое устройство, которое вводилось в камеру сканирующего электронного микроскопа (СЭМ). Тестовое устройство содержало подвешенные пластины из SiN_x , а также пленочные Pt резисторы, которые служили одно-

временно и нагревателями, и датчиками температуры. Теплопроводность нанотрубки определяли в результате подачи определенной мощности на нагреватель и измерения температуры с помощью датчика. Геометрию образца определяли с помощью СЭМ. При измерении теплопроводности образцов нанотрубок использовали контакты прямоугольной формы из соединения платины $(\text{CH}_3)_3(\text{CH}_3\text{C}_5\text{H}_4)\text{Pt}$. Зависимости термосопротивления от длины образца удается получить, проводя последовательные измерения теплопроводности при различных положениях одного из контактов вдоль нанотрубки. Эти зависимости существенно отклоняются от прямой линии, что указывает на нарушение закона Фурье для теплопроводности нанотрубок. Так, образец УНТ длиной 5 мкм, термосопротивление которого составляет $5,87 \times 10^7$ К/Вт, характеризуется возрастающей степенной зависимостью термосопротивления от длины с показателем степени $\beta = 0,6$, в то время как в случае выполнения закона Фурье $\beta = 0$. Для образца НТНБ длиной 5,33 мкм, термосопротивление которого составляет $7,71 \times 10^7$ К/Вт, $\beta = 0,4$. При этом величина контактного термосопротивления для обоих образцов находится на уровне 25% от полного термосопротивления.

Интересно отметить, что наблюдаемое отклонение от закона Фурье для теплопроводности нанотрубок имеет место даже при условиях, когда средняя длина пробега фононов l_p при их упругом рассеянии много меньше длины нанотрубки L . Так, оценки l_p , выполненные на основе измерений коэффициента теплопроводности, дают величину $l_p \approx 30\text{--}50$ нм, что значительно превышает длину исследованных нанотрубок.

А.Елецкий

I. C.W.Chang et al., Phys. Rev. Lett. 101, 075903 (2008).

Получение массивов углеродных нанотрубок миллиметровой длины

Для практического применения углеродных нанотрубок (УНТ), таких как композитные материалы на основе УНТ, наконечники силовых микроскопов, сенсоры и т. п., необходимо иметь нанотрубки как можно большей длины. Недавно было установлено, что длина нанотрубок, выращиваемых методом химического осаждения паров (CVD), существенно зависит от длительности синтеза, температуры процесса, а также от характеристик используемых при этом частиц катализатора. Однако еще одним важным параметром, влияющим не только на длину, но также на число слоев и степень кристалличности синтезируемых нанотрубок, является скорость подачи газов, используемых для синтеза УНТ. Детальное исследование такого влияния выполнено недавно группой исследователей из Пекинского университета, которым удалось, варьируя параметры газового потока, получать нанотрубки миллиметровой длины с желаемым числом слоев. В каче-

стве подложки использовали кремниевые пластины с поперечным размером 10 см, покрытые слоем SiO_2 толщиной 600 нм. Катализатором служила пленка $\text{Fe}(1,2 \text{ нм})/\text{Al}_2\text{O}_3(30 \text{ нм})$, нанесенная методом электронного напыления. Полученную пластину разрезали на кусочки площадью $1 \times 1 \text{ см}^2$. Синтез УНТ проводили при атмосферном давлении и температуре 800°C в кварцевой печи с внутренним диаметром 2,5 см. Для повышения активности частиц катализатора через печь, в которой помещен образец подложки, в течение 8 мин пропускали водород со скоростью $50 \text{ см}^3/\text{с}$. Это приводило к образованию частиц катализатора с поперечным размером в диапазоне 20–40 нм и поверхностной плотностью расположения на подложке 380–420 частиц/ мкм^2 . Синтез УНТ проводили в течение часа в потоке $\text{Ar}/\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$. При этом полная скорость газового потока составляла $220 \text{ см}^3/\text{с}$, поток аргона поддерживался на уровне $50 \text{ см}^3/\text{с}$, а потоки водорода и этилена варьировали в диапазонах 30–100 и 20–100 $\text{см}^3/\text{с}$, соответственно. После окончания процедуры синтеза печь охлаждали в потоке аргона до комнатной температуры. Полученные нанотрубки исследовали с помощью сканирующего и просвечивающего электронных микроскопов, а также спектрометра комбинационного рассеяния (КР).

Результаты измерений указывают на высокую чувствительность длины синтезируемых УНТ к скорости потока этилена. Этот параметр достигает максимальной величины (около 1,3 мкм) при потоке C_2H_4 около $50 \text{ см}^3/\text{с}$. Аналогичным образом ведет себя зависимость степени кристалличности нанотрубок, определяемая стандартным образом через отношение пиков I_G/I_D в спектре КР. Максимальная степень кристалличности, соответствующая величине указанного отношения 1,4, наблюдается при потоке этилена около $50 \text{ см}^3/\text{с}$. Скорость потока этилена оказывает определяющее влияние не только на длину и степень кристалличности УНТ, но также и на число слоев в синтезируемых УНТ. Так, при потоке этилена $40 \text{ см}^3/\text{с}$ синтезируются УНТ с числом слоев в диапазоне от 2 до 13; при потоке $50 \text{ см}^3/\text{с}$ число слоев находится в диапазоне 8–35, а при потоке $100 \text{ см}^3/\text{с}$ нанотрубки имеют от 18 до 45 слоев. Тем самым оказывается, что увеличение скорости потока этилена сопровождается ростом числа слоев синтезируемых нанотрубок.

Скорость потока водорода также оказывает существенное влияние на параметры синтезируемых УНТ. Зависимость длины синтезируемых УНТ от этого параметра имеет резкий максимум равный 1,3 мм при скорости потока $50 \text{ см}^3/\text{с}$. Аналогичный характер зависимости от скорости потока водорода имеет степень кристалличности УНТ, которая также достигает максимума ($I_G/I_D = 1,4$) при скорости потока $50 \text{ см}^3/\text{с}$. При этом отмечается рост степени кристалличности с увеличением длины УНТ. Наблюдается также резкая зависимость числа слоев синте-

зируемых УНТ от скорости потока водорода. Так, при скоростях потока водорода 30, 50 и 100 см³/с образуются УНТ с числом слоев 12–43, 3–35 и 1–9, соответственно. Однако даже при наличии однослойных УНТ в спектре КР не наблюдаются радикальные дышащие моды, что связано с большим диаметром (более 3 нм) образующихся однослойных УНТ.

Наряду с парциальными потоками газовых компонентов, полная скорость подачи газа также является важным параметром, определяющим характеристики образующихся нанотрубок. Так, увеличение полной скорости потока газа с 220 до 440 см³/с при сохранении парциального соотношения неизменным приводит к уменьшению длины синтезируемых нанотрубок от 1,3 до 0,32 мкм и параметра кристалличности с 1,4 до 0,58. При этом число стенок уменьшилось с 8–35 до 6–30. Таким образом, синтез нанотрубок с нужными параметрами методом CVD может быть обеспечен в результате варьирования скорости и состава потока газа, используемого в рамках данного метода.

А.Елецкий

1. H.Zhang et al., J. Phys. Chem. C 112, 12706 (2008).

ФИНАНСИРОВАНИЕ И РЫНОК

Римская колесница и наностандарты

Несмотря на очевидную задержку эры 450-мм кремниевых подложек (и не только из-за финансового кризиса), инициаторы этих разработок (компания International Sematech, Intel, TSMC и Samsung) сформулировали предварительные стандарты: толщина подложек - 925(±25) мкм (для сравнения, толщина 300-мм подложек – 775 мкм) [1].

Утверждение этого стандарта важно для будущих разработчиков и производителей соответствующих приспособлений и оборудования. Так, 450-мм кремниевая пластина толщиной 925 мкм будет весить 330 г и может прогибаться при захвате в держатель. Важно сделать приспособления для удержания и захвата пластины, которые позволят избежать критического прогиба пластины. В ожидании скачка в 450-мм эру Sematech анонсировала план создания испытательного «полигона» ("factory integration test bed" facility) для тестирования оборудования и приспособлений.

Intel, TSMC и Samsung полагают, что эпоха прототипов 450-мм фабрик наступит в 2012 г. (или около этого). Но, многие чипмейкеры считают, что из-за дороговизны перевода промышленности на 450 мм, такие фабрики не появятся никогда. Они утверждают, что 300-мм фабрики вполне удовлетворяют всем запросам, и реальная цель промышленности – улучшить производительность на сегодняшних 300-мм фабриках. Если же 450-мм фабрики и появятся, то в связи с освоением 8- или даже 5-нм технологии формирования топологического рисунка ИС, что

прогнозируется в период с 2017 по 2019 г.г. Приход 450-мм пластин на промышленном уровне может обойтись в сумму от 20 до 40 млрд. долл. [2].

В связи с попыткой Sematech, как минимум, на десятилетия опережая 450-мм события, ввести стандарты на 450-мм кремниевые пластины поучительна история, рассказанная в блоге [3] А. Брауном (Alexander E. Braun).

В США ширина железнодорожной колеи (расстояние между рельсами) составляет 4 фута + 8.5 дюйма (143.25 см). Откуда это странное число?

На первый взгляд ответ кажется простым. Этот размер использовали в Англии, откуда и пришла железнодорожная технология в США. В Англии первые железнодорожные линии были построены на основе тех же шаблонов, которые использовали изготовители вагонов - именно такое расстояние было заложено между колесами вагонов.

Эти размеры были не только традиционными, но и практичными, так как хорошо подходили к борозде, оставленной лошадиными упряжками на дорогах Британских островов. А эти старые дороги были построены здесь (как, впрочем, и по всей Европе) во времена Римской империи, когда Лондон еще был ее грязной окраиной.



Рис. 1. Римская боевая колесница и лошади – многотысячелетний стандарт: глубокий след боевой римской колесницы на европейской дороге послужил мерой для расстояния между колесами железнодорожных вагонов.

Рим строил дороги, которые позволяли его армиям передвигаться из одного охваченного волнением места («горячей точки») в другое за минимальное время. Дороги делали приспособленными не только для войск, но и для боевых колесниц. Средняя, запряженная двумя лошадьми, военная колесница имела расстояние между колесами, определяемое двумя крупными стоящими рядом лошадьми. Прошли столетия, их колеса оставили глубокий след на сохранившихся дорогах. И, спустя столетия после кон-

ца Римской империи, европейцы продолжали делать свои коляски с межколесным расстоянием, подходящим для римских дорог. Это расстояние и стало первым неумышленным стандартом, дожившим до железных дорог и... не только.

На снимке (рис. 2) можно заметить, что основной топливный бак Шаттла имеет две ракеты, закрепленные с противоположных сторон. Это – стартовые двигатели, которые производят в штате Юта и оттуда их доставляют по железной дороге до стартовых площадок в штате Невада. На этом пути – горный железнодорожный туннель, сквозь который необходимо «протащить» двигатели. Туннель, естественно, только слегка шире железнодорожной колеи, которая, как мы уже знаем, совпадает с шириной двух лошадиных крупов. Так вот, так получилось, что по прошествии 20 столетий в конструкции космических двигателей заложен тот же стандарт – размер...ну, вы сами догадаетесь чего.



Рис. 2. Шаттл - это частица Древнего Рима в космосе.

На старте нанотехнологического века было бы хорошо, чтобы в России не произошел казус, аналогичный ее железным дорогам. Руководствуясь сиюминутными тактическими военными соображениями, царь Николай I приказал расширить колею российских железных дорог на 10 см от стандарта, принятого в европейских, о чем вот уже более сотни лет с досадой вспоминают пассажиры, с задержкой пересекая российскую границу. Увы! Исправить это досадное недоразумение не представляется возможным, учитывая грандиозную сеть российских железных дорог. Следует помнить о пользе вечных стандартов, выбирая пути реализации своих проектов.

1. <http://www.eetimes.com/news/latest/showArticle.jhtml?articleID=211300360&pgno=2>
2. <http://www.eetimes.com/news/semi/showArticle.jhtml?articleID=210900029>
3. <http://www.semiconductor.net/blog/920000492/post/690030469.html>

КОНФЕРЕНЦИИ

Специальное заседание редакционной коллегии журнала «Успехи физических наук» посвященное 90-летию издания журнала на русском языке и 50-летию выхода его английской версии, 19 ноября 2008 г., 14.00

(Ленинский просп., 53, Главное здание ФИАН, конференц-зал)

ПОЗДРАВЛЯЕМ всех авторов, редакторов, рецензентов, переводчиков и сотрудников журнала «Успехи физических наук» с юбилейной датой! Желаем дальнейших творческих успехов и новых читателей.

Авторы и редакция ПерсТа



Научная сессия ОФН РАН, посвященная 100-летию со дня рождения члена-корреспондента РАН С.М. Рыкова 26 ноября 2008 г., 14.00

(Ленинский просп., 53, Главное здание ФИАН, конференц-зал)

Программа

1. Академик **Гуляев Ю.В.** - Вступительное слово
2. **Барабаненков Ю.Н.** (ИРЭ РАН) - Асимптотический предел теории переноса излучения в задачах многократного рассеяния волн случайно-неоднородными средами
3. **Каплан А.Е.** (Johns Hopkins University, USA) - Локальные оптические поля в наноструктурах: наностраты, магические числа, и другая нанокаббалистика
4. **Кляцкин В.И.** (ИФА РАН) - Современные методы описания стохастических динамических систем
5. **Долин Л.С.** (ИПФ РАН) - Развитие теории переноса излучения в приложении к задачам инструментального видения в мутных средах

Web: <http://www.gpad.ac.ru/>

Дорогие наши читатели!

Этот год для ПерсТа юбилейный – нам 15 лет!

Мы будем рады Вашим отзывам и пожеланиям в наш адрес.

Редакция

Экспресс-бюллетень ПерсТ издается 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, А.Елецкий, Л.Опенев, А.Пятаков

Компьютерный ввод, макет: И.Фурлетова

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