

В этом выпуске:

СВЕРХПРОВОДНИКИ

In situ контроль концентрации дырок в поверхностном слое $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$

Для понимания явления высокотемпературной сверхпроводимости важно знать, как меняется электронная структура ВТСП при изменении концентрации дырок p в проводящих слоях CuO_2 . Но если наличие в сильно передопированных образцах большой дырочной поверхности Ферми можно считать доказанным, то характер ее эволюции при уменьшении p остается предметом дискуссий. Исследования поверхностей скола монокристаллов $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ и $\text{Ca}_{2-x}\text{Na}_x\text{CuO}_2\text{Cl}_2$ методом фотоэмиссионной спектроскопии с угловым разрешением (ARPES) показали, что уменьшение p ниже оптимальной (отвечающей максимуму T_c) величины приводит к разрыву поверхности Ферми на четыре “фермиевские дуги”, которые, возможно, как-то связаны с псевдощелью. Напротив, наблюдение квантовых осцилляций в упорядоченной недоопированной орто-II фазе $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$ говорит не о разрыве поверхности Ферми, а о ее реконструкции, сопровождающейся образованием дырочных и электронных “карманов”. Прояснить этот вопрос могли бы данные об ARPES-спектрах $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$. Но ситуация осложняется отсутствием в Y-123 естественной плоскости скола [001]: на поверхности оказывается либо слой BaO , либо слой с цепочками CuO , либо комбинация фрагментов этих слоев (рис. 1). Причем концентрация дырок в ближайшем слое CuO_2 составляет $p \approx 0.3$ – независимо от номинального уровня допирования образца и значительно больше, чем в объеме ВТСП $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ с максимальным содержанием кислорода. Такие же проблемы имеют место и в ВТСП Y-124. Их причина заключается в поляризации поверхности скола, что приводит к существенному передопированию поверхностных слоев из-за эффекта “самодопирования”. Поэтому для $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$ данные ARPES не имеют отношения к электронной структуре недоопированной фазы.

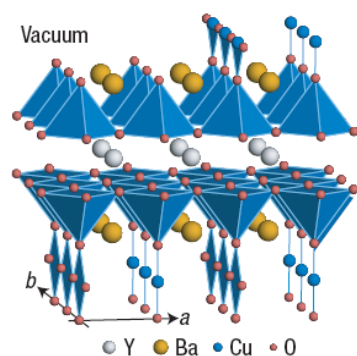


Рис. 1.
Поверхность скола $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$.

Канадские (University of British Columbia) и американские (Lawrence Berkeley National Laboratory) физики предложили следующий способ *in situ* контроля концентрации дырок в поверхностном слое $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$ [1]. На свежую поверхность скола они осаждали атомы калия, являющиеся донорами электронов (то есть акцепторами дырок), что позволило приготовить поверхности с $p = 0.20$ (близко к оптимальному уровню допирования) и $p = 0.11$ (недоопированная, но еще сверхпроводящая фаза). ARPES показала, что при $p = 0.11$ поверхность Ферми действительно разбивается на “дуги”, как и в $\text{Ca}_{2-x}\text{Na}_x\text{CuO}_2\text{Cl}_2$ с $p = 0.12$. Таким образом, отсутствие большой когерентной поверхности Ферми является, по-видимому,

И далее ...

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОЭЛЕКТРОНИКА

2 Электронная структура “молекул” из двух квантовых точек в углеродной нанотрубке

3 Электроника на лентах
Терагерцы из разности

4 СТМ-литография нанолент из графена

Визуализация динамики атомов и молекул на графене

5 Углеродные наноматериалы защищают природу

7 Оптомеханика

СПИНТРОНИКА

7 Молекулярная спинтроника

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

8 Визуализация процесса роста углеродных нанотрубок с помощью изотопа ^{13}C

Однослойные углеродные нанотрубки различного цвета

9 ВЕСТИ С КОНФЕРЕНЦИЙ

9 Памяти
Николая Алексеевича
Черноплекова

ми дырок), что позволило приготовить поверхности с $p = 0.20$ (близко к оптимальному уровню допирования) и $p = 0.11$ (недоопированная, но еще сверхпроводящая фаза). ARPES показала, что при $p = 0.11$ поверхность Ферми действительно разбивается на “дуги”, как и в $\text{Ca}_{2-x}\text{Na}_x\text{CuO}_2\text{Cl}_2$ с $p = 0.12$. Таким образом, отсутствие большой когерентной поверхности Ферми является, по-видимому,

общей чертой всех недодопированных ВТСП. Но как тогда соотнести данные ARPES с квантовыми осцилляциями, наблюдавшимися в $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$? Ведь ARPES не обнаружила в этом ВТСП никаких следов дырочных и электронных “карманов”. Авторы [1] высказывают предположение, что фермиевские дуги на самом деле представляют собой маленькие дырочные “карманы”, внешние стороны которых ARPES просто “не видит” из-за резкого уменьшения когерентного фактора вблизи антиферромагнитной зоны Бриллюэна. Однако все равно остается неясным, откуда в $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$ берутся еще и электронные “карманы”? Одно из возможных объяснений заключается в том, что сильные магнитные поля, используемые в экспериментах по осцилляциям, индуцируют новое электронное состояние, не такое, как при $H = 0$ в экспериментах по ARPES. Окончательно разобраться в этом вопросе еще предстоит. Как бы то ни было, предложенная в [1] методика не только открывает путь к контролю концентрации носителей на поверхности различных купратов и сложных оксидов, но и позволяет, в принципе, достичь уровня допирования, неосуществимого в объеме образца. Можно, в частности, попытаться сделать из передопированной поверхности $\text{Ti}_2\text{Ba}_2\text{CuO}_{6+\delta}$ недодопированную или даже получить сверхпроводимость n -типа, стартуя с диэлектрического родительского соединения.

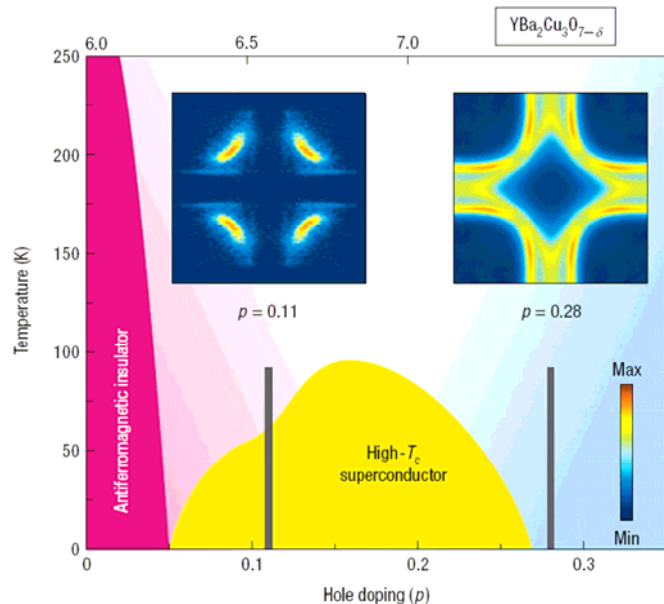


Рис. 2. Фазовая диаграмма $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ в координатах «температура – концентрация дырок p ». На вставках – поверхности Ферми недодопированной ($p = 0.11$) и сильно передопированной ($p = 0.28$) поверхностей скола $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$ по данным ARPES [1].

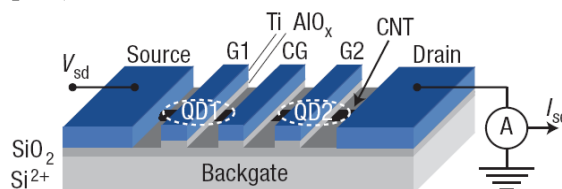
Л.Опенев

1. M.A.Hossain et al., *Nature Phys.* **4**, 527 (2008).

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Электронная структура “молекул” из двух квантовых точек в углеродной нанотрубке

“Искусственные молекулы” из двух квантовых точек, называемые также “двойными квантовыми точками” (double quantum dots, DQD), представляют собой идеальные модельные системы для исследования зарядовых и спиновых состояний нескольких взаимодействующих электронов, локализованных в окрестностях двух пространственно разнесенных минимумов потенциальной энергии и способных туннелировать между этими минимумами через разделяющий их потенциальный барьер. Обычно для экспериментов используются полупроводниковые DQD [1], а в работе [2], выполненной в Великобритании (Hitachi Cambridge Laboratory) и Дании (University of Copenhagen), исследована электронная структура DQD, сформированная в углеродной нанотрубке путем подачи соответствующих электрических потенциалов на управляющие электроды (см. рис.).



Схематическое изображение двух квантовых точек (QD1 и QD2) в углеродной нанотрубке (CNT). G1, CG (central gate) и G2 – электроды, формирующие квантовые точки. Эти электроды контролируют число электронов в квантовых точках и высоту разделяющего их туннельного барьера.

Показано, что низколежащие энергетические уровни образуют “оболочки”, для заполнения которых требуется (в зависимости от параметров DQD) четыре или восемь электронов. В DQD с четырех-электронными оболочками обнаружены синглетные и триплетные состояния, посредством которых осуществляется неупругое сотуннелирование электронов при транспорте через DQD. Изучено влияние магнитного поля до 7 Тл на энергии этих состояний. Экспериментальные данные хорошо согласуются с теоретическими расчетами. Ожидается, что время сохранения спиновой когерентности в DQD из нанотрубок будет гораздо больше, чем в полупроводниковых DQD. Такие DQD можно будет использовать не только для фундаментальных исследований, но и в различных приложениях, например, в квантовых вычислительных устройствах на основе спиновых кубитов.

1. J.A.Petta et al., *Science* **309**, 2180 (2005).

2. H.I.Jorgensen et al., *Nature Phys.* **4**, 536 (2008).

Электроника на лентах

Еще не научились толком формировать микроэлектронные структуры на основе графена (монослой графита), а уже полным ходом исследуют свойства так называемых нанолент из графена (nanoribbons). Исследуют пока теоретически. Что касается изготовления самих структур, то про технологов говорят, что они изловчатся сделать что угодно, лишь бы это было очень нужно. Вот сейчас и выясняется, зачем бы это было нужно.

Как оказалось, сам графен в качестве канала полевых транзисторов в схемах логики и памяти не годится. У такого транзистора нет закрытого состояния. При изменении полярности напряжения на затворе с положительного на отрицательное изменяется только характер проводимости канала: вместо электронов в нем начинают проводить дырки. Эта особенность вызвана отсутствием запрещенной зоны в графене. Чтобы получить запрещенную зону, необходимо использовать двухслойный графен. Другую возможность предоставляют наноленты. Нанолентой называется вырезанная из графена полоска. Естественно, для приобретения новых по сравнению с простым графеном свойств она должна иметь нанометровую ширину. В этом случае запрещенная зона возникает из-за поперечного квантования (см. рис. 1, сверху).

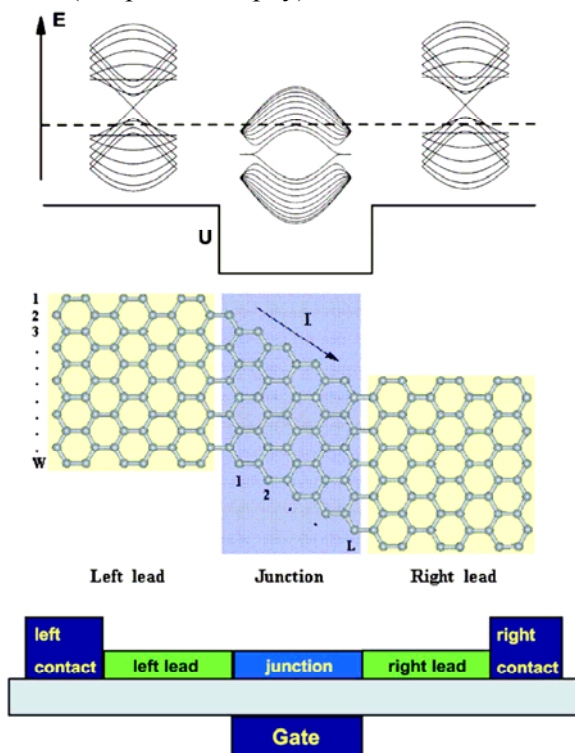


Рис. 1. Выпрямитель на Z-контакте. Энергетический спектр в различных областях канала (сверху), атомная структура изогнутого канала (в центре), вид сбоку на структуру (снизу).

На характер квантования огромное влияние оказывает структура границы. Обратите внимание на то, что на рис. 1 (в центре) на разных участках расположение атомов на границе разное, кроме того, по-

лоски вырезаны под разными углами. Из-за этого возникает и разная зонная структура.

Китайские и канадские ученые рассчитали проводимость структуры, представленной на рис. 1, и обнаружили у нее выпрямляющие свойства [1]. Для этого надо подать напряжение на затвор. На рис. 1 (сверху) штриховой линией изображен уровень Ферми в равновесном состоянии. Особое свойство предложенной структуры заключается в том, что носители из левого контакта (истока) проходят в правый контакт (сток) только в узком интервале энергий вблизи уровня Ферми. Еще следует обратить внимание на то, что в контактах носители дырки, а в канале – электроны. Если подать отрицательное напряжение на сток, носители будут в него проходить. Если подать положительное напряжение, то носители будут «упираться» в запрещенную зону. На этом и основан эффект выпрямления.

Казалось бы, это не ахти какое достижение, ведь давно хорошо известны конструкции выпрямляющих диодов: p-n переходы и контакты металл-полупроводник. Однако попробуйте их «продлить в нанометры» – у вас ничего не получится. Указанные контакты имеют характерный размер, меньше которого их делать нельзя. Этот размер равен ширине области обеднения, для легирования 10^{18} см^{-3} это 40 нм. Характерный размер рассматриваемых структур равен 4 нм и выпрямление тока в них основано совсем на других физических принципах.

В.Вьюрков

1. Z.F. Wang et al., *Appl. Phys. Lett.* **93**, 133119 (2008).

Терагерцы из разности

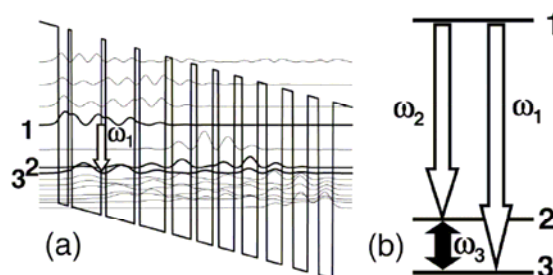


Рис. 1. Рассчитанные волновые функции в гетероструктуре каскадного лазера (а), лазерные переходы с уровня 1 на уровни 2 и 3, терагерцовая частота ω_3 (б).

Известная группа исследователей под руководством Federico Capasso (Harvard University) сообщает об экспериментальном развитии идеи получения терагерцового излучения из разности двух частот лазерной генерации в каскадном лазере [1]. На рис. 1а представлены рассчитанные энергетические уровни в структуре каскадного лазера и соответствующие им волновые функции. На рис. 1б представлены лазерные переходы с верхнего уровня 1 на уровни 2 и 3. Поскольку лазерная структура является нелинейной средой, из нее должны выходить

колебания на разностной частоте ω_3 , которая соответствует длине волны 60 мкм.

Эксперимент показал, что идея работает, но слабо. При температуре 80 К мощность терагерцового излучения равна 7 мВт

В.Вьюрков

I. Belkin et al., Appl. Phys. Lett. 92, 201101 (2008).

СТМ-литография нанолент из графена

Для практической реализации идей нанoeлектроники предстоит решить две основные задачи: научиться с высокой точностью изготавливать элементы нанoeлектронных устройств и затем объединять эти элементы в функциональные цепи. И то, и другое – весьма трудоемкие процессы, требующие больших затрат времени. Попытки сконструировать такие устройства из углеродных нанотрубок (обладающих необходимыми электронными характеристиками) натолкнулись на отсутствие надежных методов селективного роста нанотрубок с требуемой хиральностью и необходимость формирования между ними электрических контактов. Альтернативой нанотрубкам является графен, а точнее – его наноразмерные фрагменты. Электронная структура узких графеновых нанолент (в том числе величина диэлектрической щели E_g) определяется их шириной и кристаллографической ориентацией, что в принципе делает возможным изготовление нанолент с заданными электронными характеристиками. Однако стандартный метод электронно-лучевой литографии для этих целей использован быть не может: наноленты получаются недостаточно узкие, и поэтому щель E_g (которая обратно пропорциональна их ширине) слишком мала для использования таких нанолент в устройствах с комнатной рабочей температурой. Кроме того, при электронно-лучевой литографии затруднен контроль ориентации нанолент.

Венгерские (Research Institute for Technical Physics and Materials Science Budapest) и бельгийские бельгийские (Facultes Universitaire Notre Dame de la Paix, Namur) нанотехнологи предложили новый способ изготовления графеновых нанолент и их соединения между собой [1]. Он основан на использовании сканирующего электронного микроскопа (СТМ) и назван авторами “СТМ-литографией”. Подавая на иглу СТМ большое напряжение (несколько вольт, значительно больше, чем при получении СТМ-изображения) и двигая иглу по графену с постоянной скоростью (несколько нанометров в секунду), удастся в буквальном смысле “вырезать” наноленту из графена (рис. 1а). При этом ширину наноленты можно контролировать с нанометровой точностью, а ее электрические свойства определяются ориентацией линии разреза относительно кристаллографических осей. Изменение направления движения иглы приводит к образованию двух контактирующих нанолент с разным типом проводимости (рис. 1б). Таким образом можно создавать

сложные интегрированные наносхемы – основу будущей нанoeлектроники.

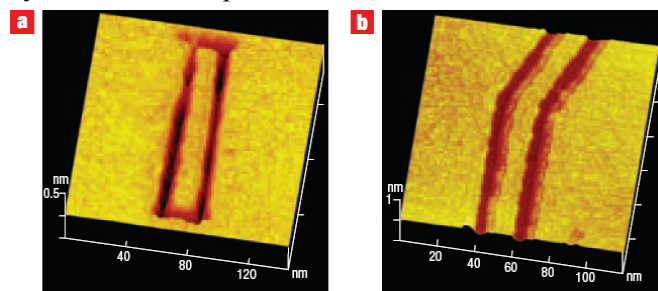


Рис.1. Наноструктуры, полученные из графена с помощью электронно-лучевой литографии: (а) графеновая нанолента; (б) контакт металл-полупроводник между двумя нанолентами с ориентациями “armchair” и “zigzag”.

Еще одно возможное применение графеновых нанолент предложили корейские физики (Pohang University) в теоретической работе [2]. Путем расчетов из первых принципов они показали, что магнитосопротивление наноленты типа “zigzag” может быть в несколько тысяч раз больше, чем до сей поры наблюдалось на эксперименте. Для этого нужно использовать ферромагнитные электроды, превратив тем самым наноленту в “спиновый вентиль” (рис. 2). Такие наноленты очень пригодятся в спинтронике для переноса спин-поляризованного тока.

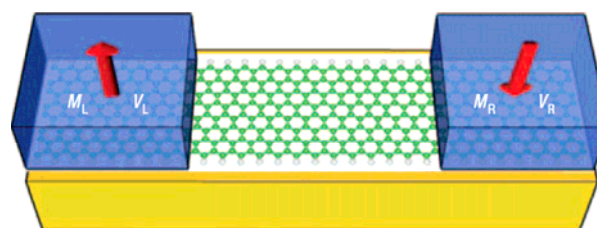


Рис.2. Графеновая нанолента типа “zigzag” с двумя ферромагнитными электродами. Красные стрелки указывают направление магнитного поля.

Л.Опенев

1. L.Tapaszo et al., Nature Nanotechn. 3, 397 (2008).

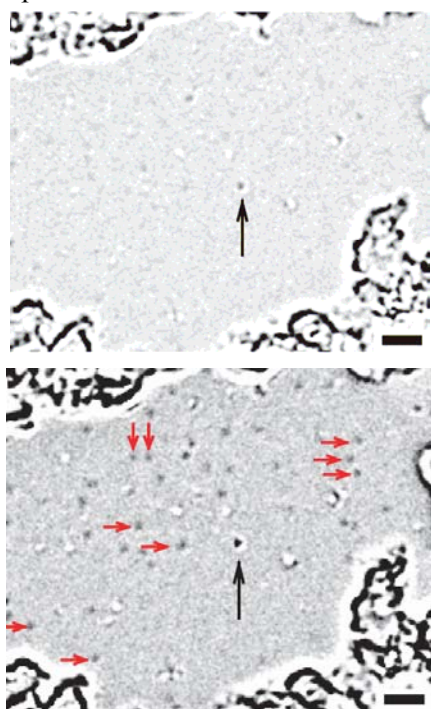
2. W.Y.Kim, K.S.Kim, Nature Nanotechn. 3, 408 (2008).

Визуализация динамики атомов и молекул на графене

Основной целью микроскопии является наблюдение атомов и молекул – “кирпичиков” любого конденсированного вещества. Это стало возможным после изобретения в 1982 году сканирующего электронного микроскопа (СТМ). Однако применимость СТМ ограничена, в том числе, типом материала (он должен быть проводящим), требованиями к чистоте исследуемой поверхности и низкой скоростью сканирования. В более старой методике – просвечивающей электронной микроскопии (transmission electron microscopy, TEM) – за последние годы достигнут существенный прогресс, и теперь с ее помощью удастся обнаружить отдельные примесные атомы, даже если они расположены внутри полупроводникового образца. Но это относится только к “тяжелым” (с большим атомным но-

мером) атомам. “Разглядеть” легкие атомы (например, углерод и тем более – водород), не получается из-за низкого контраста.

Однако американские специалисты из University of California at Berkeley и Lawrence Berkeley National Laboratory обнаружили [1], что это все-таки возможно, но при условии, что атомы находятся не абы где, а на мембране из графена. При этом отдельные адсорбированные атомы водорода и углерода, вакансии и углеродные цепочки видны так же отчетливо (см. рис.), как если бы они находились в пустом пространстве, поскольку из-за малой толщины графенового слоя и его идеальной кристаллической структуры он либо остается невидимым для ТЕМ, либо (при очень высоком разрешении) его вклад в ТЕМ-изображение легко “вычитается”. Эффекты зарядки из-за воздействия электронного пучка несущественны благодаря хорошей электропроводности графена. Авторы [1] наблюдали также движение адсорбированных на графене атомов и молекул в режиме реального времени (из-за сильного взаимодействия адсорбентов с графеном скорость их перемещения составляет всего лишь ~ 10 нм/час). Кроме того, в [1] была непосредственно изучена динамика процесса аннигиляции вакансий с адсорбентами. Можно надеяться, что использование графена в качестве “подстилки” при ТЕМ-исследованиях позволит уже в ближайшее время изучить детали некоторых химических реакций, а также будет способствовать развитию графеновой наноэлектроники.



ТЕМ-изображения атомов углерода (показаны черными стрелками) и водорода (красные стрелки), полученные в работе [1]. Длина масштабной линейки 2 нм.

Л. Опенов

1. J.C.Meyer et al., *Nature* **454**, 319 (2008).

Углеродные наноматериалы защищают природу



Лето. Пора отпусков... Несмотря на капризы погоды, мы больше времени проводим в саду или лесу, отдыхаем на берегу реки, озера или у моря... И так хочется, чтобы природа продолжала радовать людей и в будущем. ПерсТ не обошел стороной возможные

экологические проблемы, связанные с перспективами применения углеродных наноматериалов (УНМ). Но сейчас, наверное, подходящий момент сказать и доброе слово. Тем более что недавно в печати (пока в электронном виде) появился обзор американских ученых, посвященный полезному для окружающей среды применению УНМ [1].

В обзоре рассматривается как «превентивное» применение УНМ (для предотвращения деградации окружающей среды, улучшения здравоохранения, оптимизации энергетической эффективности), так и «ретроактивное» (восстановление, повторное использование сточных вод, борьба с уже существующими загрязнениями). Авторы начинают с того, что дают описание основных УНМ (рис.1) и их свойств, важных для защиты окружающей среды (форма, размер, удельная поверхность; молекулярные взаимодействия и сорбционные свойства; электронные, оптические и термические свойства). Эти во многом уникальные свойства позволяют применять УНМ в качестве фильтров, сорбентов, противомикробных средств, создавать на их основе сенсоры для мониторинга окружающей среды, повышать эффективность возобновляемых источников энергии. В обзоре представлены уже достигнутые результаты, а также обсуждаются возможные перспективные направления работ.

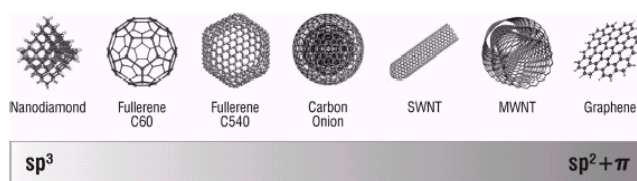


Рис.1. Различные углеродные наноматериалы

Сорбенты. Фильтры. Уникальные сорбционные свойства позволяют использовать УНМ для очистки сточных вод (и в перспективе питьевой воды). Наносорбенты на основе углерода с высоким отношением поверхности к объему и контролируемой химией поверхности преодолевают многие ограничения, присущие традиционным сорбентам. УНМ отличаются не только высокой сорбционной емкостью, но и быстрой кинетикой, работают в широком диапазоне pH. Возможности применения УНМ для

очистки питьевой воды пока изучаются мало, хотя эти сорбенты, безусловно, должны быть еще более эффективны, чем традиционно используемые активированные угли. Пока в основном исследована очистка воды от таких вредных примесей как полициклические ароматические углеводороды, нафталин. Функционализация УНМ обеспечивает удаление конкретных микрозагрязнений, очистку от примесей, имеющих чрезвычайно низкую концентрацию, а также позволяет удалять неорганические примеси, эффективно сорбировать ионы тяжелых металлов (свинца, кадмия [2]). Область их применения не ограничивается растворами. Напомним, например, что была продемонстрирована эффективность использования углеродных нанотрубок (УНТ) в сигаретных фильтрах для поглощения никотина [3].

УНМ могут быть использованы не только как непосредственно сорбенты, но и как основа для оксидов или макромолекул. Такие «композитные» сорбенты могут поглощать комплексы, металлы, радионуклиды. Пример – декорирование УНТ наночастицами CeO_2 для удаления Cr и арсенатов; аморфным оксидом алюминия – для поглощения фторидов; полипирролом – для отделения перхлоратов.

Еще в 1997г. были предложены мембранные фильтры, в которых ориентированные («прямые») нанотрубки служили порами в непроницаемой матрице. На основе УНТ могут быть созданы мембраны, сочетающие высокую проницаемость и селективность [4]. Оптимизация мембран может быть достигнута путем изменения диаметра пор, гидрофобных свойств поверхности, функционализации кончиков УНТ.

Такие мембраны могут быть использованы для обработки воды – как для нанофильтрации, так и для обессоливания (для которого традиционно применяются полимерные мембраны, работающие по принципу обратного осмоса). Пока, однако, на практике продемонстрирована только нанофильтрация. Возможно, это связано с тем, что радиус ионов натрия меняется в диапазоне от 0,178 до 0,358 нм (в зависимости от температуры, pH раствора и других условий), и для обессоливания нужны мембраны из одностенных нанотрубок (ОСНТ) с очень малым диаметром.

Мембраны и фильтры из УНТ, безусловно, перспективны, но изготавливать их очень трудно. Другое дело композитные нанофильтры. Предлагаются разные варианты. Например, многостенные УНТ (в том числе оксидированные) могут быть внедрены в поверхностный слой обычного полимерного фильтра, повышая прочность и долговечность и в то же время увеличивая проницаемость по отношению к воде. Композиты, использующие уникальные свойства УНМ (нанотрубок, фуллеренов), отличаются не только увеличением потока, но также противомикробной активностью и термостабильностью. ОСНТ с успехом могут приме-

няться в гибридных регенерируемых керамических фильтрах (рис.2), которые позволяют удалять из воды патогенные микроорганизмы.

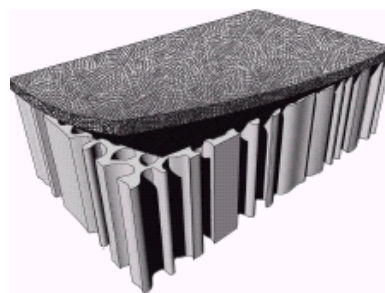


Рис.2. Пример гибридного фильтра, состоящего из пористой керамической подложки и верхнего УНТ - слоя.

Такие фильтры долговечны, термостойки, могут быть многократно использованы на местах очистки воды. Однако прежде чем расширять области применения, надо разработать методы иммобилизации УНМ. Один из ранее предложенных вариантов – непосредственный синтез МСНТ на поверхности металлического фильтра для очистки воздуха.

Противомикробные средства. Ученые надеются использовать уникальную противомикробную активность УНМ для решения вопросов защиты природы и здоровья человека. Определенные классы УНМ могут оказаться полезными для дезинфекции воды, медицинской помощи, создания антимикробных покрытий, для микробиологических исследований. Активно ведутся работы по изучению токсичности УНТ в отношении различных микробных сообществ (в том числе представляющие большой интерес для создания систем очистки питьевой воды). УНТ могут служить носителями для антимикробных частиц Ag . Суспензии nC-60 проявляют антибактериальную активность по отношению к многим бактериям при различных окружающих условиях.

Сенсоры для защиты окружающей среды. О различных сенсорах на основе УНТ было достаточно много написано в ПерсТе. Для мониторинга окружающей среды чрезвычайно важны чувствительные и быстродействующие химические, биологические и другие сенсоры. Они позволяют определять очень малые концентрации вредных примесей в воздухе и воде, обнаруживать патогенные микробы. Создание сети наносенсоров усилит безопасность в быту, позволит оперативно реагировать на появление микробов в питьевой воде, расширит возможности мониторинга подповерхностной биodeградации.

УНМ для возобновляемых источников энергии. Самой перспективной областью применения, по мнению авторов [1] является солнечная энергетика. Уникальные электронные и оптические свойства УНТ и фуллеренов позволяют создавать новые, более эффективные материалы и устройства для улавливания, хранения и преобразования солнечной энергии.

УНМ важны и для водородной энергетики. Результаты многих исследований показали, что используя УНТ и нановолокна можно значительно улучшить характеристики электрокатализаторов, необходимых для работы топливных элементов.

Авторы обзора [1] отмечают, что УНМ помогают в решении вопросов охраны природы и косвенным образом. Их использование в химии в качестве катализаторов, носителей, реагентов, в мембранах повышает эффективность многих процессов, сберегает энергию. Это же относится и к их использованию в электронике.

Применяя УНМ для защиты окружающей среды, необходимо понимать, что эта фаза – фаза их использования – является всего лишь частью полного «жизненного» цикла от создания до утилизации. Зелёная химия, зелёная технология требуют учета всех фаз. Преимущество УНМ заключается еще и в том, что на их основе могут быть созданы композиты с повышенной прочностью, сроком работы, что дает минимизацию потока материала за время жизненного цикла. Кроме того, их можно регенерировать или вторично использовать в другом качестве – например, отработанные наносорбенты можно применить для упрочнения композитов. Но, конечно, еще предстоит оптимизировать условия производства УНМ, используя более «зеленые» методы синтеза и очистки.

О.Алексеева

1. M.S. Mauter, M. Elimelech, *Environ. Sci. Technol.* **42**, 5843 (2008).
2. *ПерсТ* **14**, вып.12/13, с.6 (2007).
3. *ПерсТ* **13**, вып.9, с.6 (2006).
4. *ПерсТ* **14**, вып.22/23, с.9 (2007).

Оптомеханика

О том, что свет может оказывать на вещество механическое воздействие, первым догадался Иоганн Кеплер. В 1619 году он предположил, что причиной искривления хвостов комет являются солнечные лучи. Спустя почти 300 лет давление со стороны излучения было измерено в лабораторных условиях русским ученым П.Н.Лебедевым. Сейчас оптомеханические явления используются в различных приложениях (например, для охлаждения атомов и даже макроскопических объектов (рис. 1а), что позволяет, в частности, изучить особенности перехода от квантового режима к классическому и лучше понять роль декогеренции в таком переходе).

В июльском номере *Nature Physics* сообщается о двух новых работах в области оптомеханики. Авторы [1] вместо оптической полости использовали микроволновой резонатор на чипе (рис. 1б). Предполагается, что в сочетании с нелинейными элементами (например, джозефсоновскими контактами) такая конструкция может найти применение в квантовой информатике для измерения состояний кубитов. В работе [2] роль отражающего зеркала играл ан-

самбль атомов рубидия, колеблющихся вблизи своих равновесных положений в оптической решетке (рис. 1с). Будучи охлажденными до микрокельвинных температур, атомы находятся в основном колебательном состоянии. Авторы [2] наблюдали эффект “обратного действия” атомов на свет, заключающийся в сдвиге соответствующих резонансных частот. Прогресс в оптомеханике будет, безусловно, способствовать развитию самых различных направлений современной физики и технологии.

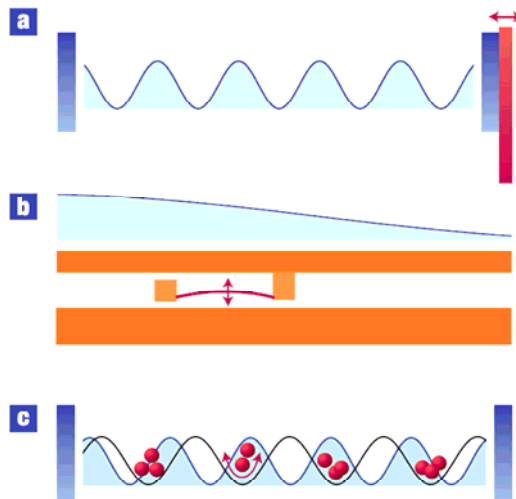


Рис.1. (а) Свет в оптической полости, воздействуя на прикрепленное к кантилеверу зеркало, может как охладить его, так и “раскачать”; (б) микроволновой резонатор [1]; (с) оптическая решетка с атомами, помещенная в резонатор [2].

1. C.A.Regal et al., *Nature Phys.* **4**, 555 (2008).

2. K.W.Murch et al., *Nature Phys.* **4**, 561 (2008).

СПИНТРОНИКА

Молекулярная спинтроника

Что ожидают от молекулярной электроники вообще и молекулярной спинтроники в частности? Ожидают уменьшение размеров элементов, снижение энергии переключения, но, самое главное, ожидают хорошую воспроизводимость элементов. Молекулы и атомы являются эталонными образованиями. Искусственно формируемые наноструктуры (например, квантовые точки и проволоки) в настоящее время далеки от совершенства.

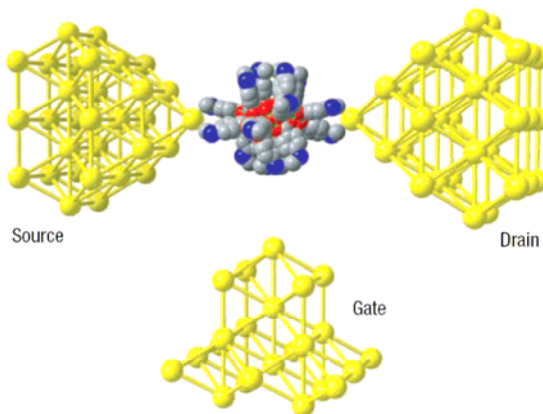


Рис. 1. Полевой транзистор с магнитной молекулой в качестве канала.

На рис. 1, взятом из обзорной статьи [1], приведен вид пока фантастической структуры. Фантастикой является то, что молекула находится в контакте с отдельным атомом металла. Действительно, как отмечается в статье, молекулы идеально воспроизводятся, но вот их контакт с металлом – нет. Именно в этом направлении ведутся сейчас интенсивные исследования, и прогресс в них явно присутствует.

Общий принцип работы молекулярного полевого транзистора прост. Напряжением на затворе мы смещаем энергетическое положение молекулярных орбиталей относительно уровня химического потенциала в контакте истока. Если свободный уровень оказывается ниже, то электрон из контакта истока переходит на молекулу и затем в контакт стока. В противном случае тока нет. Естественно, рассматривая переход электрона на молекулу надо учитывать кулоновскую энергию, а, если в молекуле содержится магнитный атом, то и обменную энергию. Иными словами надо учитывать кулоновскую и спиновую блокаду тока. В последнем случае такой транзистор явно принадлежит к спинтронике. Направление намагниченности молекулы можно изменять с помощью электрического поля, создаваемого затвором. За счет спин-орбитального взаимодействия магнитный момент будет прецессировать. В обычной конструкции спинового транзистора, предложенной Datta и Das, спин электронов, пролетающих по каналу транзистора прецессирует, а в качестве спинового клапана выступает контакт истока, который пропускает в себя только электроны определенной спиновой поляризации. В настоящем предложении сам канал выступает в роли спинового вентиля. Вопрос только в том, какое напряжение надо подать на затвор и сколько времени ждать, пока «переключится» направление магнитного момента молекулы. Как и в случае транзистора Datta и Das, может оказаться, что реальное спин-орбитальное взаимодействие слишком мало.

По поводу энергии переключения спинового транзистора произносят слова, что она равна нулю. Это только отчасти справедливо. Действительно, на прецессию магнитного момента энергия не тратится, но она определенно тратится на зарядку емкостей контактов.

В.Вьюрков

1. L. Bogani et al., Nature Materials 7, 179 (2008).

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

Визуализация процесса роста углеродных нанотрубок с помощью изотопа ^{13}C

Несмотря на значительные успехи, достигнутые в области получения, исследования и использования углеродных нанотрубок (УНТ), механизм их роста до сих пор остается до конца невыясненным. В частности, неясно, каким образом растет нанотрубка – со стороны наконечника либо со стороны основания. Причины такой неопределенности связаны с

трудностями экспериментального исследования процесса роста УНТ, которые, в свою очередь, обусловлены их миниатюрными размерами и сложным характером каталитических процессов, сопутствующих синтезу УНТ. Недавно группой исследователей из нескольких японских университетов [1] был поставлен прямой эксперимент, позволяющий установить детали каталитического роста УНТ. В качестве метода синтеза горизонтально ориентированных УНТ на сапфировой подложке использовали химическое осаждение паров метана в присутствии катализатора на основе Fe-Mo. При этом с целью визуализации процесса роста нанотрубок на разных стадиях роста использовали метан CH_4 различного изотопного состава – $^{12}\text{CH}_4$ и $^{13}\text{CH}_4$. Изменение изотопного состава метана отражается на соответствующем изотопном составе синтезируемой УНТ, что можно зарегистрировать с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния (КР). На начальной стадии роста в камеру в течение 1 мин вводили $^{13}\text{CH}_4$, который затем заменяли на $^{12}\text{CH}_4$. Длительность перехода с одной изотопной модификации метана на другую составляла 30 секунд. Средняя длина выращенных таким образом однослойных УНТ составляла 10 мкм. Скорость роста УНТ, оцененная на основании измерений спектров КР в процессе роста, находилась в пределах 0,5–3 мкм/с. Анализ пространственных распределений спектров КР показал, что концентрация изотопа ^{13}C повышается по мере продвижения в направлении наконечника нанотрубки. Этот результат соответствует представлению о механизме роста УНТ, согласно которому нанотрубка растет со стороны основания.

А.В.Елецкий

1. H.Ago et al., J. Phys. Chem. C 112, 1735 (2008).

Однослойные углеродные нанотрубки различного цвета

Практическая реализация значительного прикладного потенциала, заложенного в углеродных нанотрубках (УНТ), станет возможной после того как будет развит надежный подход к разделению нанотрубок, отличающихся своими характеристиками. От успешного решения этой задачи зависят дальнейшие пути развития наноэлектроники, основанной на использовании УНТ. В связи с этим вызовом усилия многих лабораторий мира направлены на развитие методов разделения УНТ по характеру проводимости, диаметру и даже индексам хиральности, характеризующим угол ориентации графитовой плоскости, составляющей нанотрубку, относительно оси УНТ. К настоящему времени продемонстрирована возможность частичного разделения или обогащения УНТ в результате проведения химических реакций, электромагнитного облучения, а также центрифугирования. При этом в большинстве экспериментов производится разделение однослойных УНТ с металлическими и полупроводниковыми

ми свойствами. Недавно в одной из лабораторий Национального института передовых исследований Японии было продемонстрировано успешное разделение однослойных УНТ, обладающих металлической проводимостью, по диаметрам. В основу применяемого подхода положено разделение нанотрубок, подвергаемых воздействию поверхностно активного вещества, в ультрацентрифуге. Это позволило получить образцы материала нанотрубок, обладающие различными оптическими свойствами. Наряду с образцами однослойных УНТ, полученными методом лазерной абляции кристаллического графита в атмосфере Ag в присутствии катализатора на основе Co/Ni (средний диаметр 1,4 нм) (ЛИА), в эксперименте использовали также нанотрубки, полученные в результате термокаталитического разложения СО при высоком давлении (средний диаметр ~1,0 нм) и УНТ, выращенные с помощью катализатора на основе Co-Mo (средний диаметр ~ 0,8 нм). Образцы, содержащие УНТ трех типов, подвергали стандартной процедуре очистки, включающей в себя диспергирование в 1% растворе соли диоксихолата натрия, используемого в качестве поверхностно-активного вещества, ультразвуковую обработку и центрифугирование. Приготовленные таким способом дисперсии вновь подвергали процедуре центрифугирования с градиентом плотности, результатом чего было разделение УНТ по диаметрам. Центрифугирование производили в течение 18 ч при нагрузке до 288000g. В результате центрифугирования были получены образцы металлических УНТ определенного диаметра (1,34, 1,0 и 0,84 нм), обладающие различным ярко выраженным цветом (голубой, ярко-красный и желтый). Эти различия, которые подтверждаются результатами измерений спектров комбинационного рассеяния, обусловлены зависимостью спектра поглощения нанотрубки от ее диаметра. Естественно ожидать, что из основного набора УНТ можно приготовить образцы нанотрубок любого цвета, в соответствии с известными классическими законами смешения цветов. Результаты измерений поверхностного сопротивления пленок, полученных из описанных выше образцов УНТ (65, 450 и 1000 Ом/см²) указывают на возможность создания на основе этих образцов проводящих пленок различного цвета.

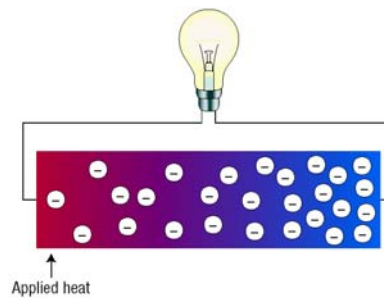
А.В.Елецкий

1. K.Yanagi, Y.Miyata, H.Kataura, *Appl. Phys. Express* **1**, 034003 (2008).

ВЕСТИ С КОНФЕРЕНЦИЙ

Наличие в термоэлектрических материалах градиента температур приводит к появлению в них электрического напряжения, и наоборот. Взаимосвязь термических и электрических характеристик позволяет, например, изготовить из таких материалов устройства, передающие тепло из холодной области к нагретой (рефрижераторы) или генерирующие электричество из тепловых потоков (см. рис.).

ПерсТ, 2008, том 15, выпуск 15/16



Пример термоэлектрического устройства.

“Термоэлектрическая эффективность” образца определяется величиной $ZT = \sigma S^2 T / k$, где σ – проводимость, S – термоэдс, T – температура, k – теплопроводность. Для ее увеличения требуются вещества с высокой σ и низкой k . На конференции *Unconventional Thermoelectrics*, состоявшейся 26-30 мая в Страсбурге, обсуждались последние достижения в этой области. Наибольший резонанс вызвало сообщение группы из Massachusetts Institute of Technology (докладчик – M.Dresselhaus) о резком повышении ZT при использовании так называемых “наноструктурированных материалов” (состоящих из зерен с нанометровыми размерами или содержащих какие-то другие нанонеоднородности). Физическая причина этого эффекта заключается в уменьшении k из-за того, что размеры неоднородностей становятся меньше длины свободного пробега фононов, дающих основной вклад в теплопроводность. Обычно наноструктурирование требует особых условий синтеза и обработки. Но иногда в многофазных образцах оно происходит “само собой”, как это имеет место, например, в Ag-Pb-Sb-Te (доклад Q.Li из Brookhaven National Laboratory). Ожидается, что развитие нанотехнологий (в широком смысле этого слова) приведет к дальнейшему прогрессу в области термоэлектричества. Как знать, быть может, это позволит даже найти нестандартное решение для решения надвигающейся на человечество проблемы “энергетического голода”, научившись получать электричество “на халяву” из температурных перепадов.



Памяти Николая Алексеевича Черноплекова

Ушли шестидесятые, уходят шестидесятники... **3 августа 2008г.** внезапно навсегда ушел от нас **Николай Алексеевич Черноплеков**, заслуженный деятель науки, член-корреспондент Российской академии наук, лауреат Государственных и Правительственной премий, многолетний директор им же созданного ИСФТТ РНЦ «Курчатовский институт», шестидесятник...

Шестидесятники ... К ним людская молва причисляет далеко не всех, живших в шестидесятых. Шести-

десятичник... Это – внутренне присущий демократизм, мягкая интеллигентность, сохранение достоинства в любых ситуациях, отсутствие суеты, безупречная порядочность. Упоывая на землю пухом и вечную память, знавшие Николая Алексеевича, давайте будем помнить его и вспоминать о нем, пока живем. Вспомним сегодня, что говорили в день 70-летия Николая Алексеевича его коллеги и друзья.

Юрий Андреевич Осипьян: «Отличительной чертой Н.А. являются постоянство и порядочность во взаимоотношениях с людьми. Он никогда не вилает и не дрожит в зависимости от всяких внешних обстоятельств... Он умеет установить неизменные, серьезные и, я бы даже сказал, любовные отношения с людьми. Н.А. – это человек, способный на крепкую дружбу...

Н.А. был ведущим специалистом и организатором в СССР работ в области технической сверхпроводимости, он породил и исполнил в нашей стране громадную работу, связанную с применением сверхпроводимости в электротехнике».

Михаил Григорьевич Землянов: «Н.А. оказался для меня не только хорошим собеседником, но и тем человеком, который по жизни был мне просто необходим. Его всегда растаскивали на части, он был нужен всем и по самым разным вопросам...»

Борис Николаевич Гощицкий: «Н.А. относится к числу легендарных ученых, которые обеспечивали и обеспечивают становление новых научных и прикладных направлений в СССР и сейчас в России».

Виктор Лазаревич Аксенов: «Н.А. внес колоссальный вклад в нашу нейтронную физику. Он является пионером нейтронного дела в нашей стране. По существу, все, связанное с рассеянием нейтронов, что делалось в нашей стране, вышло из Курчатковского института при непосредственном личном участии и под руководством Н.А. К тому же, он человек исключительно порядочный, честный, открытый. Его человеческое обаяние делает для нас неотвратимым становиться его союзниками, его партнерами».

Анатолий Дмитриевич Никулин: «Разработки сверхпроводящего кабеля из станнида ниобия для магнитов токамака, организация его серийного выпуска в Усть-Каменогорске, в Казахстане – везде здесь в центре был Черноплеков. Вокруг Н.А. объединились не только москвичи, но и научные коллективы тогда огромной страны – СССР, и харьковчане, и киевля-

не, и минчане, и многие другие. Н.А. был всегда выше местнических подходов. В организации слаженного коллектива единомышленников в то время его ведущая роль не вызывает сомнений. Он и руководимый им коллектив из Курчатковского института стали центрообразующим началом, вокруг которого концентрировалась и была ключом научная и инженерная мысль... Интеллигентность, мягкость Н.А., готовность рассказать, убедить способствовали созданию здоровой творческой атмосферы... Любимыми детьми Н.А. стали токамаки. При его участии родились токамак Т-7 со сверхпроводящим магнитом из ниобий-титанового сплава и токамак Т-15 с магнитом из станнида ниобия... Н.А. всегда был совершенно безупречен и в отношении своей семьи».

Владимир Федорович Елесин: «Н.А. обладал редкой способностью разрядить напряженную атмосферу острой шуткой... Он сыграл одну из главных ролей в создании кафедры «Физики и технического применения сверхпроводимости» в МИФИ, профессором которой и являлся... Н.А. – очень красив внешне и очень артистичен... Н.А. – не авторитарен. И слава Богу! Это и хорошо, что в его характере нет авторитарности. Если считать, что это плохо, то только для него лично. Мягким человеком быть трудно, но так нужно. Конечно, если сможешь...».

Александр Георгиевич Плещ: «Стиль его руководства, можно сказать, изыщен. Он выслушает мнение всех, потихоньку подведет к нужному ему решению, и всем будет казаться, что это и есть коллективное решение. Это – очень тонкий ход истинного топ-менеджера».

Маргарита Николаевна Михеева: «Н.А. хорошо знает и любит поэзию, часто цитирует из Блока, Симонова... Н.А. – очень душевный, отзывчивый человек, готовый прийти на помощь любому. Он бесконечно тратит себя...»

Валерий Иванович Ожогин: «Больше всего в этом крупном Человеке, поражает его беспредельная трудоспособность и неутомимая (хотя внешне безупречно спокойная) энергия. Ну прямо как у ядерного реактора!».

Ядерный реактор погас. Мы не услышим энергичное «Решительно приветствую вас!». Его долго многим будет не хватать...

Редакция и авторы ПерсТа

Экспресс-бюллетень ПерсТ издается совместной информационной группой
ИФТТ РАН и РНЦ «Курчатowski 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.В.Елецкий, Л.Опенков

Компьютерный ввод, макет: И.Фурлетова

Адрес редакции: 119296 Москва, Ленинский проспект, 64