

Памяти академика Юрия Андреевича Осипьяна



10 сентября 2008 года оборвалась жизнь академика Осипьяна Юрия Андреевича - выдающегося ученого и организатора отечественной науки, привнесшего неоценимый вклад в развитие физики конденсированного состояния вещества. Научную деятельность Ю.А. Осипьян начал в 1955 году после окончания Московского института стали и сплавов. Он теоретически исследовал влияние квантовых эффектов на кинетику бездиффузионных фазовых переходов в кристаллах. Им также были выполнены экспериментальные исследования

механических свойств нитевидных кристаллов и продемонстрировано, что их реальная прочность близка к теоретическому пределу.

В начале 60-х годов Ю.А. Осипьян начал проводить пионерские экспериментальные исследования, связанные с изучением взаимодействия электронов с протяженными дефектами в кристаллах. В этот период им открыто очень неожиданное и интересное явление, известное в настоящее время в научной литературе как фотопластический эффект. Ю.А. Осипьян совместно с учениками впервые обнаружил электропластический эффект и наличие заряда на дислокациях в полупроводниках $A^{II}B^{VI}$, существование кластеров «оборванных» валентных связей в ядрах дислокаций в кремнии, электронный спиновый резонанс и спинзависимую рекомбинацию на дислокациях. Изящные эксперименты по высокочастотной проводимости привели к обнаружению квазиодномерных электронных зон, связанных с дислокациями и комбинированного резонанса электронов на дислокациях в кремнии. Было установлено влияние магнитного поля на пластическую деформацию сверхпроводников. Таким образом, было показано, что состояние электронной системы сильно влияет на пластическую деформацию, т.е. на движение дислокаций через исследуемый кристалл, и в свою очередь, введение дислокаций приводит к изменению свойств электронной системы в пластически деформированных кристаллах. Из первых экспериментов по электронному парамагнитному резонансу на оборванных связях в настоящее время развился мощный метод диагностики полупроводников - ЭПР спектроскопия дефектов в полупроводниках.

Все эти работы послужили становлению новой, успешно развивающейся области физики - физики дислокаций в полупроводниковых кристаллах. Заслуги Ю.А. Осипьяна и созданной им научной школы в развитии этого направления физики твердого тела получили международное признание, а российская наука в области дислокационной физики тела заняла ведущее положение в мировой науке. Научный вклад академика Ю.А. Осипьяна в физику твердого тела не ограничивается лишь физикой дислокаций.

Когда в середине 80-х годов в литературе появились первые сооб-

И далее ...

СВЕРХПРОВОДНИКИ

- 2 Отсутствие сверхпроводящих флуктуаций в псевдощелевом состоянии купратных ВТСП
- 3 Сверхпроводимость тяжелых дырок в $\beta\text{-YbAlB}_4$

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОЭЛЕКТРОНИКА

- 4 Молекулярные “нанозагоны”
Технологичный графен
Терагерцы из разности
- 5 Скачущие наночастицы
Мезоскопический Сизиф

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

- 6 Бозе-конденсация в оптической решетке

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

- 6 Сети из углеродных нанотрубок для топливных элементов
- 7 Проблемы разделения и обогащения однослойных углеродных нанотрубок
- 8 Совместная научная сессия ОФН РАН и ОНИТ РАН, посвященная 100-летию со дня рождения академика В.А. Котельникова, 17 сентября 2008 г

щения об обнаружении высокотемпературной сверхпроводимости, Ю.А. Осипьян сразу оценил всю важность произошедшего и необходимость для любой развитой страны срочно заняться этой проблемой на самом высоком уровне. Он активно включился в исследования свойств нового класса сверхпроводящих материалов и быстро завоевал международный авторитет и признание в этой актуальной области. По предложению Юрия Андреевича в ИФТТ РАН был проведен ряд исследований структурных и физических свойств кристаллов высокотемпературных сверхпроводников, в частности, изучен механизм двойникования кристаллов, структура магнитного потока в сверхпроводнике, анизотропия проводимости, оптика сверхпроводящей и нормальных фаз ВТСП монокристаллов.

По инициативе Ю.А. Осипьяна была сформирована Государственная программа по проблеме высокотемпературной сверхпроводимости, руководителем которой он был в течение многих лет. В рамках этой программы Юрий Андреевич совершил смелый организационный эксперимент – впервые в нашей стране была разработана и внедрена современная конкурсная система отбора наиболее перспективных научных работ, которая теперь принята в РФФИ, в Миннауки РФ и в других организациях.

Делом всей жизни Ю.А. Осипьяна стала организация и становление Института физики твердого тела РАН, расположенного в Научном Центре РАН в Черноголовке, подбор и воспитание научных кадров, обеспечение и поддержание высокого научного уровня ведущихся в нем исследований и необходимой для этого доброжелательной и демократической атмосферы внутри института. В настоящее время ИФТТ РАН является одним из крупнейших академических учреждений физического профиля в мировой науке, в котором проводится широкий круг исследований в области физики конденсированного состояния и физического материаловедения, ведется интенсивная подготовка молодых научных кадров на базе кафедр МФТИ, МГУ, МИСИС.

Ю.А. Осипьян возглавлял ряд общественных и научных организаций. Он являлся председателем Научного совета РАН по физике конденсированных сред, председателем Национального комитета российских кристаллографов, председателем Комитета российских ученых за разоружение. Вклад Ю.А. Осипьяна в физическую науку неоценим. Ю.А. Осипьян являлся автором более 300 научных трудов. Он воспитал огромную плеяду учеников, создал научную школу. Академик Осипьян Ю.А. получил признание и в нашей стране, и за рубежом. В числе его наград два ордена Трудового Красного Знамени (1971 и 1975), два ордена Ленина (1981 и 1986), орден «За заслуги перед Отечеством» II степени (1999). В 1986 году академику Ю.А. Осипьяну было присвоено звание Героя Социалистического

Труда. В 2005 году за фундаментальный вклад в физику дислокаций в твердых телах и открытие фотопластического эффекта Ю.А. Осипьяну была присуждена высшая награда Российской академии наук – Большая золотая медаль РАН им. М.В. Ломоносова.

Природа одарила Юрия Андреевича высочайшими человеческими качествами. В нем от рождения была заложена удивительная жизнестойкость, дополненная сильным характером. Жизнелюбия в Юрии Андреевиче было так много, что оно не вмещалось в нем и выплескивалось вовне, вовлекая в его жизнь тысячи участников. Его всегда отличали доброжелательность, мудрость, интеллигентность, высочайшая порядочность, умение сопереживать, тонкое чувство юмора. Именно таким останется он в сердцах и памяти друзей и соратников, всех с кем он работал и дружил, всех тех, кто искренне уважал и любил его.

Редакция и авторы ПерсТа

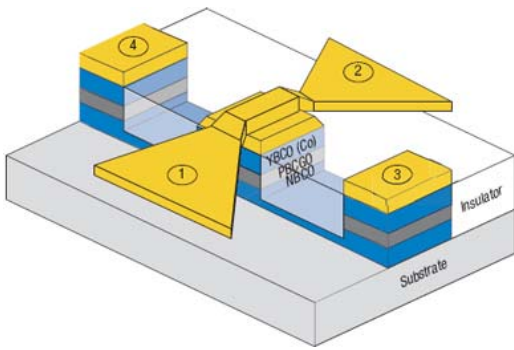
СВЕРХПРОВОДНИКИ

Отсутствие сверхпроводящих флуктуаций в псевдощелевом состоянии купратных ВТСП

При $T_c < T < T^*$ в спектрах электронных возбуждений купратных ВТСП наблюдается резкое уменьшение спектрального веса – так называемая псевдощель. Фотоэмиссионная (ARPES) и сканирующая туннельная (STS) спектроскопии показывают, что при охлаждении ниже T_c характеристическая энергия псевдощели сравнивается со сверхпроводящей щелью. Отсутствие резкой границы между псевдощелевым и сверхпроводящим состояниями послужило основанием для модели высокотемпературной сверхпроводимости, согласно которой куперовские пары формируются при $T = T^*$, но остаются некогерентными вплоть до $T = T_c$. При этом в интервале $T_c < T < T^*$ теория предсказывает наличие сверхпроводящих флуктуаций, хотя $R \neq 0$. Экспериментальное подтверждение (или опровержение) такого сценария затруднено тем, что большинство известных методов исследования псевдощели (ARPES, STS, ЯМР и пр.) чувствительны только к одночастичным возбуждениям и не в состоянии зарегистрировать флуктуирующие куперовские пары, если последние действительно присутствуют в образце.

Для поиска сверхпроводящих флуктуаций в псевдощелевом состоянии недодопированного ВТСП $YBa_2Cu_{2.8}Co_{0.2}O_7$ с $T_{c1} = 61$ К французские ученые в работе [1] исследовали характеристики джозефсоновского контакта между этим ВТСП и оптимально допированным образцом $NdBa_2Cu_3O_7$ с $T_{c2} = 90$ К $> T_{c1}$ (см. рис.). Роль диэлектрической прослойки играла тонкая пленка $PrBa_2Cu_{2.8}Co_{0.2}O_7$. Согласно теории эффекта Джозефсона, если в нормальном состоянии недодопированного ВТСП присутствуют некоррелированные куперовские пары, то при

$T_{c1} < T < T_{c2}$ должен иметь место избыточный ток I_{ex} , пропорциональный мнимой части магнитной восприимчивости пар.



Джозефсоновский контакт $\text{YBa}_2\text{Cu}_{2.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_7$ (100 нм) – $\text{PrBa}_2\text{Cu}_{2.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_7$ (30 – 50 нм) – $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (200 нм).

Такой ток наблюдали ранее в обычных низкотемпературных сверхпроводниках [2], но только в очень узком температурном диапазоне вблизи T_{c1} (флуктуационная сверхпроводимость). Что же увидели авторы [1]? При повышении температуры выше T_{c1} величина I_{ex} быстро уменьшалась и обращалась в нуль при $T \approx T_{c1} + 14 \text{ K} \ll T^* \approx 250 \text{ K}$. Пик избыточной проводимости при нулевой энергии были присущи все атрибуты обычных гауссовых флуктуаций. Ширина флуктуационной области (около 15 K) гораздо больше, чем в обычных сверхпроводниках, но так и должно быть из-за очень малой длины когерентности в ВТСП. А вот флуктуации, связанные с псевдощелью, в ВТСП отсутствуют. Значит, псевдощель имеет несверхпроводящую природу и возникает из-за какого-то другого, несвязанного со сверхпроводимостью упорядочения – зарядового или магнитного.

Л.Опенев

1. N.Bergeal et al., *Nature Phys.* **4**, 608 (2008).
2. J.T.Anderson, A.M.Goldman, *Phys. Rev. Lett.* **25**, 743 (2008).

Сверхпроводимость тяжелых дырок в $\beta\text{-YbAlB}_4$

Во многих соединениях церия, в которых носителями заряда являются так называемые тяжелые фермионы, при очень низких температурах наблюдается сверхпроводимость. Преобладает точка зрения, что механизм спаривания не фононный, а магнитный, но остается совершенно непонятно, почему сверхпроводимость отсутствует в дырочных аналогах этих соединений на основе иттербия. За двадцать лет непрерывных поисков не был найден ни один тяжелофермионный иттербиевый сверхпроводник. И вот, наконец, японско-английско-американскому коллективу удалось изготовить соединение $\beta\text{-YbAlB}_4$, которое при охлаждении до $T_c = 80 \text{ мК}$ переходит в сверхпроводящее состояние [1].

Его кристаллическая структура не такая, как у давно известной фазы $\alpha\text{-YbAlB}_4$, а магнитная восприимчивость χ сильно анизотропна (рис. 1а). В отли-

чие от большинства тяжелофермионных соединений, сопротивление $\beta\text{-YbAlB}_4$ при $H = 0$ не квадратично по T , а линейно при $T = (1 \div 4) \text{ K}$ и ведет себя как $\rho_{ab} \sim T^{1.5}$ при $T_c < T < 1 \text{ K}$ (рис. 1б). Это говорит о том, что в нормальном состоянии $\beta\text{-YbAlB}_4$ электронная подсистема не является ферми-жидкостью. Температурные зависимости χ и магнитной составляющей удельной теплоемкости C_M при $H = 0$ и $T \sim 1 \text{ K}$ тоже отличны от фермижидкостных. Однако увеличение H до 0.1 Тл приводит к “восстановлению” как зависимости $\rho_{ab} \sim T^2$ (рис.2), так и фермижидкостного поведения $\chi(T)$ и $C_M(T)$.

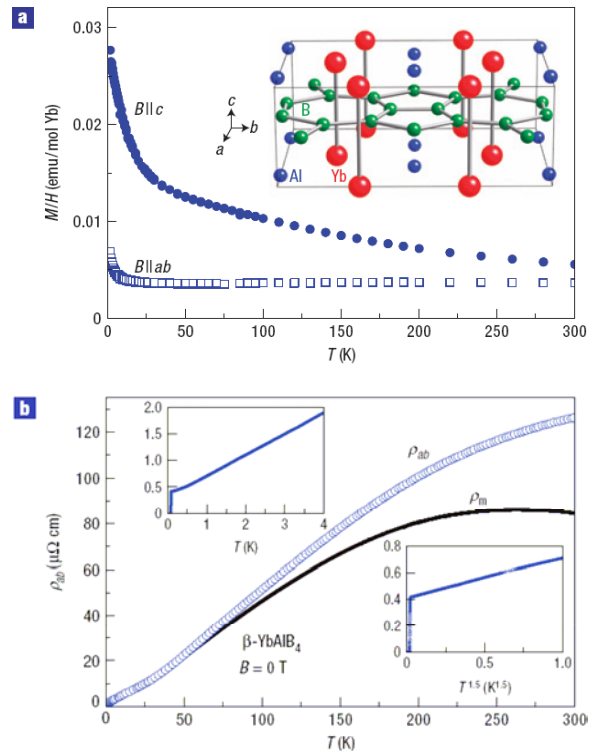


Рис.1. (а) Магнитная восприимчивость монокристалла $\beta\text{-YbAlB}_4$ в поле, параллельном и перпендикулярном оси c (на вставке – фрагмент кристаллической решетки). (б) Температурная зависимость удельного электросопротивления ρ_{ab} в плоскости a - b при $H = 0$ (кружки) и вклад в него от 4f-электронов (сплошная линия), найденный путем вычитания из экспериментальных данных величины $\rho_{ab}(T)$ в $\alpha\text{-YbAlB}_4$ – немагнитном (и несверхпроводящем) изоструктурном аналоге $\beta\text{-YbAlB}_4$. На вставках – зависимости ρ_{ab} от T и $T^{1.5}$ при низких температурах.

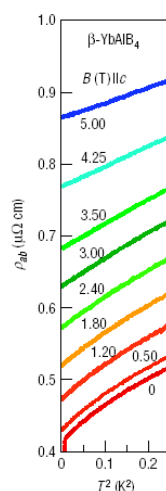


Рис.2. Температурные зависимости ρ_{ab} в магнитном поле, параллельном оси c .

Анализ экспериментальных данных свидетельствует о расхождении $\chi(T)$, $C_M(T)$ и величины $A = (\rho_{ab}(T) - \rho_{ab}(0))/T^2$ при $H = 0$ и $T \rightarrow 0$, что говорит о существовании при $H = 0$ квантовой критической точки (quantum critical point, QCP). Таким образом, $\beta\text{-YbAlB}_4$ является редким примером систем, в которых для достижения QCP не требуется изменять какие-либо внешние “контрольные

параметры”, как то: давление, уровень допирования и пр. Интересно, что экспериментальные величины критических показателей, определяющих конкретный вид расхождений $\chi(T)$, $C_M(T)$ и $A(T)$ при $T \rightarrow 0$, не согласуются ни с одной из известных теорий. Что же касается механизма сверхпроводимости β - $YbAlB_4$, здесь требуются дальнейшие исследования.

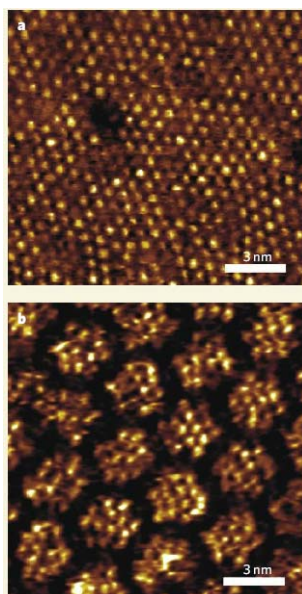
Л.Опенев

I. S. Nakatsuji et al., Nature Phys. 4, 603 (2008).

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Молекулярные “наногазоны”

Главная (и наиболее сложная) задача, стоящая перед нанотехнологиями, – разработка надежных методов, позволяющих обеспечить заранее заданное взаимное расположение атомов и молекул на сравнительно большой площади поверхности с точностью около нанометра. Различные варианты атомной зондовой микроскопии, хоть и дают принципиальную возможность наносить на подложку атом за атомом, и создавать довольно сложные рисунки, но требуют для этого слишком много времени и усилий, будучи поэтому непригодными для широко-масштабного нанопроизводства. Новый метод предложен в работе [1], авторы которой использовали самоорганизующиеся молекулярные монослои (self-assembling monolayers, SAMs). Сначала за счет самоорганизации специально подобранных органических молекул на поверхности золота формируют монослой с периодически расположенными порами. Эти поры играют затем роль своеобразных “загонов” при осаждении других молекул или атомов. В результате на поверхности формируется периодическая структура с нанометровым разрешением (см. рис.).



(a) Самоорганизация молекул на поверхности золота.
(b) Регулярный узор из гексагональных монослоев тиола [1].

Эта методика может быть использована, например, для изготовления металлических (или полупроводниковых) и “биологических” наноструктур с целью их применения в нанoeлектронике и медицинской диагностике, соответственно. Очень важно, что “молекулярные сетки” устойчивы к последующей электрохимической обработке. Помимо практического выхода, работа [1] представляет и фундаментальный интерес. Здесь остается открытым вопрос: до каких пределов можно уменьшать разме-

ры элементов SAM? От ответа на него зависит то, какими будут минимальные размеры наноструктур, которые можно изготовить данным методом.

I. R. Madsen et al., Nature 454, 618 (2008).

Технологичный графен

После первых сенсационных сообщений в 2004 г. об экспериментальном исследовании графена (монослой графита) [1] к нему сохраняется огромный научный и практический интерес. Научный интерес вызван совершенно необычной зонной структурой: носители заряда (электроны и дырки) имеют нулевую эффективную массу. Практический интерес вызван тем, что в совершенном графене ожидается огромная подвижность носителей, подобная подвижности в углеродных нанотрубках, т.е. порядка $100\,000\text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ при комнатной температуре. Пока, правда, получено $10\,000\text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$. Все равно это на порядок выше, чем подвижность носителей в чистом кристаллическом кремнии. Высокая подвижность, в конечном итоге, обуславливает высокое быстродействие приборов, например, транзисторов. Следует заметить, что привлекательным является не только однослойный истинный графен, но и графен, состоящий из нескольких слоев (FLG). У него, в отличие от истинного графена, уже есть запрещенная зона, как у обычных полупроводников. Наличие запрещенной зоны позволяет сделать ток закрытого состояния полевого транзистора весьма малым, что важно для больших логических схем.

Однако первые структуры из графена были крайне нетехнологичными. Чешуйки графита осаждали на подложку (обычно это был слой оксида кремния на кремнии). Среди них были и однослойные (истинный графен), и двухслойные, и многослойные. Потом их «нашаривали» атомно-силовым микроскопом и наносили сверху металлические электроды. Ясно, что для практических целей такая технология совершенно не годилась. Естественной мечтой стала эпитаксиальная технология: выращивание слоя графена непосредственно на подложке.

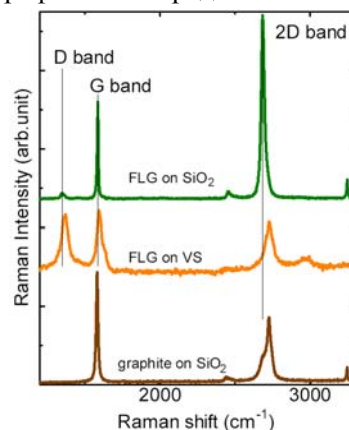


Рис. 1. Спектры рамановского рассеяния для графита на SiO_2 (внизу), графена на виртуальной подложке (в середине) и графена на SiO_2 (вверху).

Японские исследователи из Tohoku University и CREST совсем недавно добились выдающегося результата [2] в этом направлении. Вообще-то, эпитаксиальным ростом графена на карбиде кремния SiC занимаются с 1995 г. Однако подложки из этого материала неудобны. Предпочтительны кремниевые подложки, которые и используются в совре-

менной микроэлектронной промышленности. Компромисс состоит в том, что на кремниевой подложке вначале выращивают слой SiC (т.н. виртуальная подложка), а потом на нем – графен. Единственный тип SiC, который растет на кремнии – это (3C-)SiC. Всего же политипов карбида кремния порядка 200. Авторы выбрали особую ориентацию кремниевой подложки ((110) вместо (111)), чтобы кристаллическая симметрия поверхности согласовывалась с сотовой структурой графена. К сожалению, симметрия хорошая, но рассогласование постоянных решеток составляет 20%. Это приводит к напряжениям, а они, в свою очередь – к дефектам. С помощью некоторых уловок авторам удалось снизить температуру процесса эпитаксии на 200°C и получить рекордно совершенные слои графена, о чем свидетельствует малая ширина пиков на спектрах рамановского рассеяния (рис. 1).

В.Вьюрков

Автор признателен В.И.Рыжию за предоставленный материал.

1. K. S. Novoselov et al. *Science* **306**, 666 (2004).
2. M. Suemitsu et al. Presented at 14th Int. Conf. Solid Films and Surfaces, Dublin, June 30, 2008 (submitted to *e-Journal of Surface Science and Nanotechnology*).

Скачущие наночастицы

В University of Minnesota (США) провели забавный эксперимент с наночастицами и численное моделирование, которое подтвердило его неожиданные результаты. К поверхности кремния направляли кремниевые наночастицы диаметром 5 нм, которые содержали примерно 30 000 атомов. Оказалось, что медленные частицы, летящие со скоростью 900 м/с, отскакивают от поверхности, а вот быстрые (2000 м/с) – прилипают (рис. 1). Объяснение простое. Кинетическая энергия быстрых частиц переходит в деформацию кристаллической решетки. Кинетической энергии медленных частиц для этого не хватает, поэтому они отскакивают. Описанный эксперимент имеет вполне серьезные цели – изучение процессов адгезии наночастиц к поверхности, что очень важно для нанотехнологии.

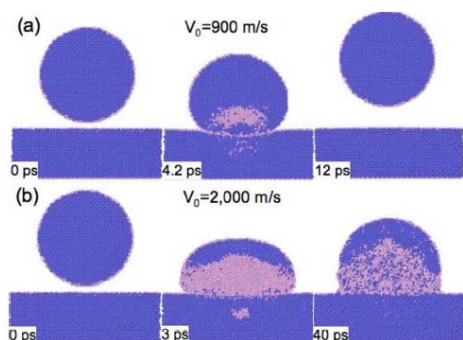


Рис. 1. Результаты моделирования: медленные частицы отскакивают (а), быстрые – прилипают (б).

В.Вьюрков

1. M. Suri et al. *Phys. Rev. B* **78**, 081405(R) (2008). *ПерсТ*, 2008, том 15, выпуск 17

Мезоскопический Сизиф

Взаимодействие лазерного излучения с веществом широко используется для охлаждения атомных газов до сверхнизких температур. Методика лазерного охлаждения занимает центральное место в современной атомной физике. Она уже нашла множество приложений, включая атомную оптику и интерферометрию, атомную литографию, спектроскопию высокого разрешения, бозе-эйнштейновскую конденсацию и пр. Одной из ее разновидностей является так называемое “сизифово охлаждение” (Sisyphus cooling): подобно камню мифического персонажа, атом раз за разом, едва достигнув вершины периодического потенциального рельефа, скатывается на его дно (рис. 1).

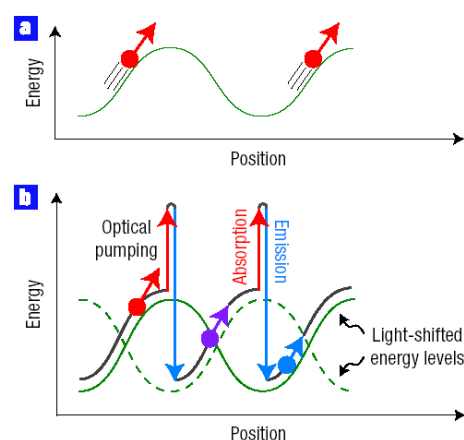


Рис.1. “Сизифово охлаждение” атомов.

(а) При движении атома в периодическом потенциале его потенциальная энергия переходит в кинетическую и обратно, тогда как полная энергия остается постоянной. После каждого периода скорость атома (красная стрелка) не изменяется.

(б) Чтобы охладить атом, нужно забрать у него энергию. Для этого используют два лазерных пучка, направленных навстречу друг другу. Интерферируя, они образуют потенциальный рельеф, в котором энергия двух атомных уровней (зеленые линии) периодически зависит от его координаты. Частоту лазерного излучения подбирают так, чтобы атом поглощал фотон, только находясь в максимуме потенциала. При этом атом сначала переходит в возбужденное состояние (вертикальная красная стрелка), а затем опускается в минимум потенциала, испуская фотон (вертикальная синяя стрелка). В результате энергия атома уменьшается на величину, равную разности энергий испущенного и поглощенного фотонов. После каждого такого цикла движение атома замедляется, то есть он охлаждается.

В работе [1] предложено оригинальное обобщение этой методики на охлаждение мезоскопических электронных устройств. Роль естественных атомов при этом играли двухуровневые “искусственные атомы” (кубиты), представлявшие собой микронные сверхпроводниковые компоненты квантовой цепи, а электрический ток через цепь выполнял функцию Сизифа, которому при этом “мешало” ре-

зонансное микроволновое излучение (рис. 2). Интересно, что та же идея может использоваться не только для “сизифова охлаждения”, но и для “сизифова усиления”: камень (кубит) скатывается с горы (переходит на нижний энергетический уровень), а затем поднимается обратно микроволновым фотоном (рис. 2). Просматривается много различных применений предложенной в [1] методики. Например, ее можно использовать для охлаждения наноразмерного механического резонатора, что позволит наблюдать переход резонатора из классического режима колебаний в квантовый.

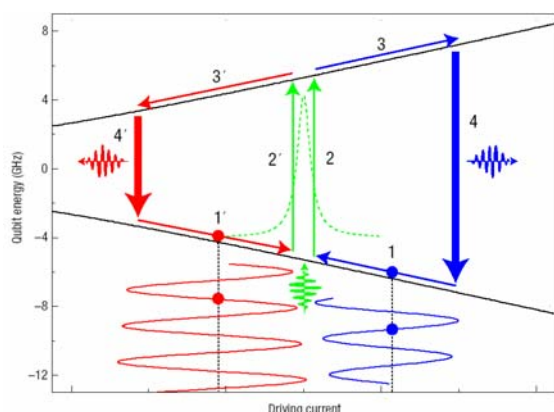


Рис.2. Сизифово охлаждение и усиление мезоскопических цепей.

Изображены зависимости энергий двухуровневого атома (кубита) от тока в цепи. Цикл $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$ – охлаждение. Цикл $1' \rightarrow 2' \rightarrow 3' \rightarrow 4'$ – усиление. Вертикальные стрелки обозначают процессы поглощения и испускания квантов микроволнового излучения.

1. M.Grajcar et al., *Nature Phys.* 4, 612 (2008).

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

Бозе-конденсация в оптической решетке

После наблюдения 1995 г. эффекта бозе-эйнштейновской конденсации атомов в оптической решетке эта система казалась более простой, чем жидкий ^4He . Начиная с первых работ по исследованию перехода из сверхтекучей фазы в фазу моттовского диэлектрика [1], экспериментальным критерием перехода в сверхтекучее состояние считалось присутствие на времяпролетных спектрах интерференционных узоров, появление которых связывали исключительно с когерентной природой волновой функции конденсата при температуре ниже критической величины T_c . Но в ряде теоретических работ такая интерпретация эксперимента была поставлена под сомнение. Разгорелась дискуссия о том, каков же истинный признак наличия в оптической решетке бозе-конденсата и может ли он отличаться от признака сверхтекучести.

Ранее путем численных расчетов было показано [2], что в жидком ^4He и плотность бозе-конденсата (определяемая по числу атомов с импульсом $\mathbf{k} = 0$), и плотность сверхтекучей компоненты одновременно становятся отличными от нуля при охлаждении до критической температуры $T_c = 2.18$ К. Из представ-

ленных в работе [3] данных квантового метода Монте-Карло следует, что для оптической решетки это тоже так, хотя здесь имеется несколько любопытных деталей. Во-первых, используя бозонную модель Хаббарда, учитывающую отталкивание частиц на узлах решетки U и их перескоки между соседними узлами t , авторы [3] показали, что даже при большой величине отношения U/t (то есть при близости системы к переходу в моттовское диэлектрическое состояние) интерференционные эффекты (пики функции распределения атомов по импульсам $n(\mathbf{k})$ при значениях $\mathbf{k}$, совпадающих с векторами обратной решетки) имеют место как при $T < T_c$, так и при $T > T_c$, где величина T_c определялась как температура появления сверхтекучей компоненты. Во-вторых, было показано, что при $T = T_c$ на максимуме $n(\mathbf{k})$ при $\mathbf{k} = 0$ появляется второй, очень узкий пик. Такую “пик-на-пике” структуру $n(\mathbf{k})$, а вовсе не интерференционные узоры, и следует считать одним из признаков формирования бозе-конденсата в оптической решетке. Вопрос – удастся ли разглядеть ее на эксперименте.

1. M.Greiner et al., *Nature* 415, 39 (2002).

2. E.L.Pollock, D.M.Ceperley, *Phys. Rev. B* 36, 8343 (1987).

3. Y.Kato et al., *Nature Phys.* 4, 617 (2008).

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

Сети из углеродных нанотрубок для топливных элементов

Благодаря удачному сочетанию рекордно высокой удельной поверхности (до $1300 \text{ см}^2/\text{г}$) с хорошими электрическими характеристиками, углеродные нанотрубки (УНТ) могут быть эффективно использованы для изготовления электродов в топливных элементах. При этом удастся полностью избавиться от металлических деталей, что позволяет существенно снизить массу устройства при сохранении его энергетических параметров. Такая возможность была продемонстрирована недавно сотрудниками Института М.Планка в Штутгарте (ФРГ), которые изготовили топливный элемент с электродами из сетей, состоящих из однослойных УНТ. Материал, содержащий однослойные УНТ, синтезировали стандартным электродуговым методом и очищали с помощью ультразвуковой обработки в концентрированной азотной кислоте. Полученную суспензию смешивали с политетрафторэтиленом и фильтровали через поликарбонатную мембрану. В результате этого на фильтре оседала запутанная гидрофобная сеть из УНТ, которая служила частью газодиффузионного электрода. Затем через полученную гидрофобную сеть фильтровали новую часть суспензии, что приводило к образованию гидрофильной сети поверх гидрофобной. Затем на верхнюю поверхность гидрофильной сети наносили $0,1\text{M}$ раствор H_2PtCl_6 в изопропанол, который служил прекурсором для образования катализатора. Восстановление прекурсора до металлической платины

(размер частиц 2–3 нм) проводили в течение часа при температуре 100°C в потоке водорода. Описанную процедуру применяли для изготовления, как анода, так и катода. При этом поликарбонатную мембрану не удаляли, а использовали в качестве сепаратора и контейнера для электролита.

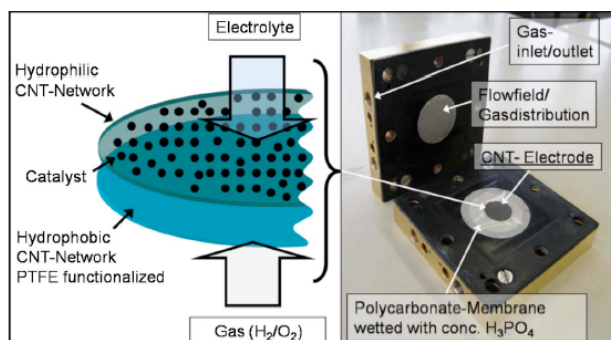


Рис. 1. Схема газодиффузионного электрода, изготовленного на основе сетей УНТ (слева) и его расположение на топливном элементе (справа)

Изготовленные таким образом электроды испытывали в конструкции топливного элемента, представленной на рис. 1. Элемент состоял из биполярных пластин, системы подачи и удаления газа и устройств для формирования газовых потоков. Электроды были обращены гидрофобной стороной к потоку, а гидрофильной стороной, покрытой мембраной, к противоположному электроду. Мембранные фильтры смачивали электролитом, в качестве которого использовали концентрированную фосфорную кислоту. Испытания показали, что проводимость изготовленных электродов на основе сетей УНТ более чем на два порядка превышает соответствующий параметр для стандартных электродов на основе аморфного углерода, в то время как толщина и масса этих электродов примерно на порядок ниже стандартных. При этом токовые характеристики электродов на основе УНТ пока на несколько десятков процентов уступают соответствующим параметрам стандартных устройств, что может быть обусловлено недостаточно оптимальной процедурой изготовления.

А.В.Елецкий

1. M. Kaempgen et al., *Appl. Phys. Lett.* **92**, 094103 (2008).

Проблемы разделения и обогащения однослойных углеродных нанотрубок

Благодаря хорошим механическим и электрическим характеристикам, а также высокой термической и химической стабильности углеродные нанотрубки (УНТ) являются привлекательным объектом для нанoeлектроники. Однако, как известно, электронные характеристики УНТ существенно зависят от их диаметра и хиральности (угол ориентации графитовой плоскости, из которой составлена нанотрубка, по отношению к оси УНТ). Поскольку традиционные способы синтеза УНТ в макроскопиче-

ских количествах приводят к получению целого набора нанотрубок с различными параметрами, для практического их использования в нанoeлектронике необходимо решить проблему разделения нанотрубок по диаметрам и хиральностям, а, следовательно, по их электронным характеристикам. К настоящему времени в результате усилий, предпринимаемых во многих лабораториях мира, наметилось несколько эффективных подходов к решению этой проблемы. Краткий обзор таких подходов опубликован недавно одним из сотрудников Северо-западного университета штата Иллинойс (США).

Один из наиболее эффективных подходов к решению проблемы разделения УНТ основан на использовании *химических реакций*, селективных по отношению к диаметру или хиральности нанотрубок. В результате проведения селективных реакций присоединения различных радикалов к УНТ образуются функционализированные нанотрубки, размер и масса которых существенно отличается от нанотрубок, не вступивших в реакцию. Дальнейшее отделение таких УНТ производят стандартными методами (центрифугирование, электрофорез и/или хроматография). В качестве селективных реакций используют процессы ковалентного присоединения радикалов к боковой стенке УНТ; ковалентное присоединение к дефектам или открытым концам нанотрубки; нековалентное инкапсулирование УНТ внутрь поверхностно-активного вещества; нековалентное облачение нанотрубки в полимерную оболочку; заполнение внутренней полости нанотрубки молекулярным веществом. При этом наиболее высокую селективность демонстрирует процесс ковалентного присоединения радикалов к боковой стенке УНТ. Так, присоединение к металлической УНТ радикалов на основе диазония делает ее селективно растворимой в тетрагидрофуране, что позволяет выделить нанотрубки с металлическими характеристиками из общего массива УНТ.

Интересной разновидностью реакций, селективных по отношению к диаметру и хиральности УНТ, являются реакции, инициируемые светом. Здесь селективность достигается благодаря зависимости сечения возбуждения оптических переходов УНТ от их диаметра. Примером такой реакции, может служить инициируемая УФ излучением реакция разрушения полупроводниковой нанотрубки в результате взаимодействия с молекулой перекиси водорода.

Другой класс процессов, способствующих селективному отбору нанотрубок с желаемыми характеристиками, включает в себя процессы *селективного разрушения* нежелательных компонент. Примерами таких процессов могут служить: селективное окисление УНТ малого диаметра и с большими углами хиральности, наблюдаемое в атмосфере кислорода или фтора; селективное травление металлических УНТ большого диаметра в плазме углево-

дорогов, приводящее к уменьшению разброса диаметров УНТ до 0.3 нм; селективное разрушение металлических УНТ в результате оптического облучения либо протекания электрического тока.

Для разделения УНТ эффективно используют подходы, нашедшие свое развитие в биологии при разделении биомолекул, размеры которых сопоставимы с размерами нанотрубок. При этом стандартным методом разделения является **электрофорез**, в основу которого положена различие подвижности молекул в геле или растворе от их массы в присутствии постоянного электрического поля. Интересной разновидностью электрофореза является диэлектрофорез, основанный на зависимости диэлектрической проницаемости УНТ в переменном электрическом поле от их электронных характеристик.

Хроматографические методы разделения УНТ, также широко используемые в биохимии для разделения биомолекул, основаны на различиях в сорбционных свойствах нанотрубок, обладающих различными электронными характеристиками. В этом плане наиболее привлекательным представляется подход, основанный на использовании молекул ДНК в качестве инкапсулирующего агента. При таком подходе однослойные УНТ малого диаметра (< 1,2 нм) в водном растворе селективно инкапсулируются внутрь ДНК. Качество селекции существенно зависит от типа используемых молекул ДНК.

Большие надежды в плане решения проблемы разделения и обогащения УНТ авторы обзора возлагают на реализацию процедуры селективного роста нанотрубок определенного сорта. Эта цель частично достигается в результате тщательного контроля температуры и давления синтеза; а также правильного выбора типов углеродсодержащего вещества и катализатора. Установлено, что использование катализаторов определенного сорта (например, сплавы на основе CoMo и FeRu) приводит к значительному сужению функции распределения УНТ по диаметрам (до 1,2 нм). Кроме того, представляется перспективным использование зародышевых нанотрубок для реализации эпитаксиального роста УНТ с определенными характеристиками.

Следует отметить, что, несмотря на значительное количество ярких идей и интересных подходов, проблема селекции и разделения УНТ по электронным свойствам остается одним из серьезных вызовов на пути развития нанoeлектроники, основанной на углеродных наноматериалах.

А.В.Елецкий

I. M.C. Hersam, Nature Nanotechnology 3, 387 (2008).



Совместная научная сессия ОФН РАН и ОНИТ РАН, посвященная 100-летию со дня рождения академика В.А. Котельникова, 17 сентября 2008 года, 11.00
(Ленинский проспект 32 «А», корпус «Г», 3 этаж)

1. Академик-секретарь ОНИТ РАН академик Е.П. Велихов - вступительное слово
 2. Академик Гуляев Ю.В. (ИРЭ РАН), «Акустоэлектроника: история, современное состояние, перспективы»
 3. Академик Пустовойт В.И. (НТЦ уникального приборостроения РАН), «Акустооптика: современное состояние и перспективы»
 4. Академик Зеленый Л.М. (ИКИ РАН), «Академик Котельников и исследования Солнечной системы»
 5. Академик Микаэлян А.Л. (НИИСИ РАН), «Исследования в области волноводной техники для систем связи»
 6. Академик Кардашев Н.С. (АКЦ ФИАН), «В.А. Котельников – радиоастрономия на Земле и в космосе»
 7. Академик Кузнецов Н.А. (ИРЭ РАН), «Теорема В.А. Котельникова – основа современной цифровой обработки сигналов»
 8. Д.ф.-м.н. Каевицер В.И. (ФирЭ РАН), «Дистанционное зондирование морского дна гидролокационными системами со сложными зондирующими сигналами»
 9. Д.т.н. Матюхин В.Г. (Федеральное агентство по информационным технологиям Минкомсвязи РФ), «Защита информации в электронном государстве»
- Web: <http://www.gpad.ac.ru/>

Экспресс-бюллетень ПерсТ издается совместной информационной группой
ИФТТ РАН и РНЦ «Курчатовский институт»

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

Научные редакторы К.Кугель, Ю.Метлин

В подготовке выпуска принимали участие: В.Вьюрков, А.Елецкий, Л.Опенев

Компьютерный ввод, макет: И.Фурлетова

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