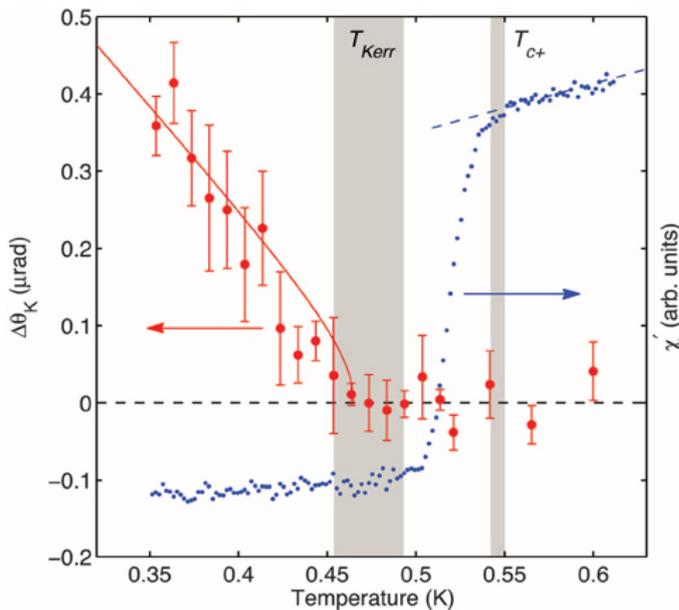


В этом выпуске:

СВЕРХПРОВОДНИКИ

О сверхпроводимости UPt_3

В соединении UPt_3 с тяжелыми фермионами наблюдаются два сверхпроводящих перехода при $T_{c+} \approx 550$ мК (фаза A) и $T_{c-} \approx 480$ мК (фаза B). Сосуществование сверхпроводимости и антиферромагнетизма ($T_N \approx 5$ К) служит основанием для гипотезы о нефононном механизме спаривания. В отсутствие детальной информации о микроскопической природе сверхпроводимости UPt_3 внимание исследователей сосредоточено на структуре сверхпроводящего параметра порядка Δ в импульсном пространстве. Многие (хотя и не все) эксперименты свидетельствуют о p -волновой форме Δ . Если это действительно так, то куперовские пары в UPt_3 образованы электронами с сонаправленными спинами (триpletное спаривание, полный спин пары $S=1$), а не с противоположно направленными, как в обычных сверхпроводниках (синглетное спаривание, $S=0$). В работе [1] исследован полярный эффект Керра в монокристаллах UPt_3 . Обнаружено, что керровский угол становится отличным от нуля только при охлаждении до температуры $T_{Kerr} \approx T_{c-}$, а не при T_{c+} (см. рис.).



Температурные зависимости керровского угла (красные точки, левая ось) и действительной части магнитной восприимчивости (синие точки, правая ось) для монокристалла UPt_3 . Здесь T_{c+} и T_{c-} – температуры начала сверхпроводящего перехода в фазу A и B , соответственно, T_{Kerr} – температура, при которой происходит нарушение симметрии относительно обращения времени. Серые полосы – погрешности T_{c+} и T_{c-} из-за эффектов оптического нагрева.

Это говорит о нарушении симметрии относительно обращения времени (то есть о tripletном характере спаривания) в фазе B , но не в фазе A . Авторы делают вывод, что параметр порядка в UPt_3

И далее ...

- 2 Нематические спиновые корреляции в $BaFe_{2-x}Ni_xAs_2$

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

- 2 Квантовая интерференция атомов в туннельно-связанных оптических пинцетах
- 3 Регулируемые спин-спиновые взаимодействия и перепутывание ионов в разнесенных потенциальных ямах

Безусловная квантовая телепортация твердотельных кубитов на макроскопическое расстояние

НАНОМАТЕРИАЛЫ

- 4 Осаждение наночастиц в дыхательной системе при использовании бытовых спреев

СПИНТРОНИКА

- 6 Спиновый эффект Пельтье

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

- 7 Фуллеренам вход свободный
Контролируемый синтез углеродных нанотрубок с заданной хиральностью

- 8 Электрохимический конденсатор переменного тока на основе углеродных наноструктур

КОНФЕРЕНЦИИ

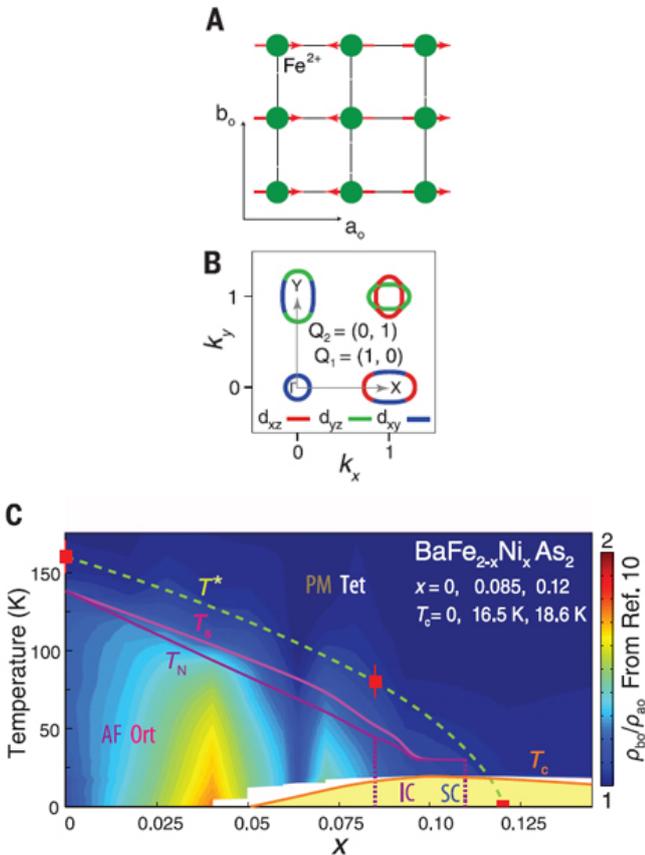
- 9 Advances in Functional Materials, June 29 - July 3, 2015, Stony Brook University, USA

является двухкомпонентным и относится к одному из четырех двумерных представлений группы D_{6h} , скорее всего E_{2u} .

1. E.R.Schemm et al., *Science* **345**, 190 (2014).

Нематические спиновые корреляции в $BaFe_{2-x}Ni_xAs_2$

При одноосном сжатии безмедных ВТСП $BaFe_{2-x}M_xAs_2$ ($M = Co, Ni$) выше температуры структурного перехода тетра-орто наблюдается анизотропия удельного сопротивления ρ в плоскости a - b . В качестве возможной причины этой анизотропии рассматривалось 1) формирование нематического спинового порядка, нарушающего симметрию C_4 тетрагональной решетки, и 2) рассеяние носителей на примесных атомах M .



A – Антиферромагнитное упорядочение спинов атомов железа в слоях FeAs родительского пниктида $BaFe_2As_2$. B – Поверхности Ферми $BaFe_2As_2$ с одним круглым дырочным карманом около точки Γ зоны Бриллюэна и двумя эллиптическими электронными карманами вблизи точек X и Y. C – Электронная фазовая диаграмма $BaFe_{2-x}Ni_xAs_2$ из данных по анизотропии ρ_{b0}/ρ_{a0} при одноосном сжатии. T^* – температура исчезновения анизотропии спиновых возбуждений. AF Ort – антиферромагнитная орторомбическая фаза, IC – несоизмеримая антиферромагнитная фаза, PM Tet – парамагнитная тетрагональная фаза, SC – сверхпроводящая фаза.

В работе [1] (Китай, Германия, США) методом неупругого рассеяния нейтронов обнаружено, что в пниктидах $BaFe_{2-x}Ni_xAs_2$ с $x = 0; 0.085$ и 0.12 температура изменения симметрии низкоэнергетических

спиновых возбуждений с четырехкратной на двукратную совпадает с температурой появления анизотропии ρ_{ab} . При этом как анизотропия спиновых возбуждений, так и анизотропия сопротивления исчезает вблизи оптимального для сверхпроводимости уровня допирования, из чего авторы делают вывод, что обе анизотропии тесно связаны.

Л.Опенев

1. X.Lu et al., *Science* **345**, 657 (2014).

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

Квантовая интерференция атомов в туннельно-связанных оптических пинцетах

Ультрахолодные атомные газы широко используются для исследования многочастичных квантовых эффектов. Поведение большой совокупности холодных атомов диктуется квантовой статистикой (фермиевской или бозевской – в зависимости от типа атомов), которая в итоге и определяет величины тех или иных макроскопических характеристик системы. Но квантовая статистика должна проявлять себя даже в том случае, когда число частиц равно всего двум. Это наглядно продемонстрировано в работе [1]. Исследователи охлаждали газ бозеатомов ^{87}Rb (с полным угловым моментом атомов $F=2$ и $m_F=2$) до милликельвинных температур, извлекали из него два атома с помощью сфокусированных лазерных пучков (“оптических пинцетов”) и сближали пучки так, что атомные волновые функции начинали перекрываться, и атомы могли туннелировать из пучка в пучок (рис. 1).

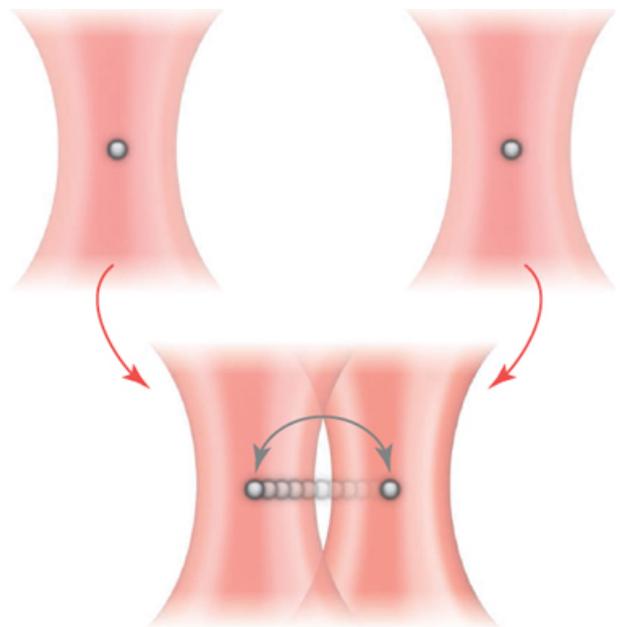


Рис. 1. При сближении двух лазерных пучков, каждый из которых “держит” в своем потенциальном рельефе один атом, эти атомы начинают туннелировать между пучками, что приводит к квантовым интерференционным эффектам.

Несмотря на то, что межатомное отталкивание мешает двум атомам находиться в одном пучке, такие

конфигурации (“02” и “20”) периодически возникают в процессе эволюции квантового состояния. Причина кроется в неразличимости атомов. Действительно, что означает неизменность конфигурации “11” (в каждом пучке по атому) за время наблюдения? То, что либо а) каждый атом остался в своем пучке, либо б) атомы поменялись местами. Другими словами, существуют два пути перехода конфигурации “11” в саму себя. Согласно квантовой механике, полная амплитуда вероятности перехода равна сумме амплитуд переходов по этим путям. В определенные моменты времени “парциальные” амплитуды оказываются равными по модулю и противоположными по знаку (деструктивная интерференция), в результате чего полная амплитуда (а вместе с ней и ее квадрат – вероятность сохранения конфигурации “11”) обращается в нуль, то есть атомам ничего не остается, как собраться вместе в одном пучке (рис. 2).

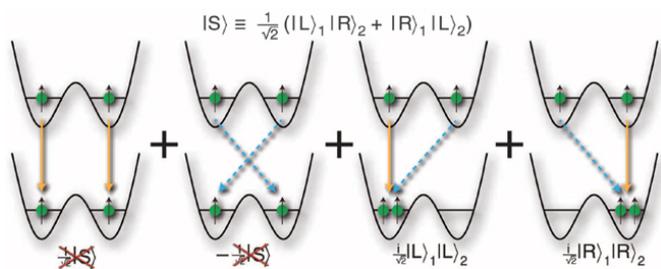


Рис. 2. При деструктивной интерференции волновых функций атомов, находившихся первоначально в разных пучках, оба атома оказываются в одном и том же пучке.

Характерные времена этих процессов в работе [1] составили ~ 1 мс. Если атомы делали различимыми (например, изменяя спиновое состояние одного из них), то интерференционные эффекты исчезали. В заключение заметим, что использование оптических пинцетов делает возможным конструирование достаточно сложных атомных квантовых систем по схеме “снизу вверх”.

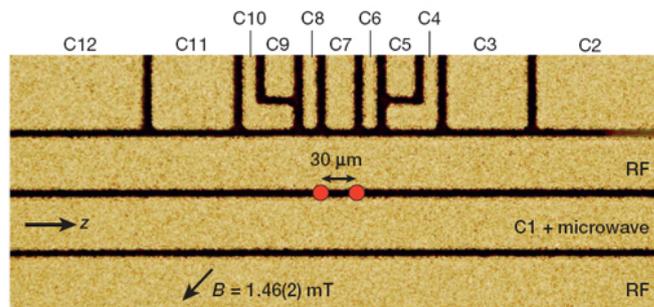
Л. Опенов

1. *A.M.Kaufman et al., Science 345, 306 (2014).*

Регулируемые спин-спиновые взаимодействия и перепутывание ионов в разнесенных потенциальных ямах

Около 30 лет назад Ричард Фейнман заметил, что для классического компьютера моделирование квантовых систем представляет собой непосильную задачу из-за экспоненциально большого числа состояний (“экспоненциальная стенка”). Альтернатива заключается в использовании квантового компьютера. Его роль может играть, вообще говоря, любая (отличная от моделируемой) квантовая система, допускающая масштабирование и полный контроль ее характеристик, например, ионы в ловушке. В работе [1] на простейшем примере двух ионов ${}^9\text{Be}^+$ в линейной ловушке Паули (см. рис.) продемонстрирована возможность регулировки ве-

личины и знака энергии эффективного спин-спинового взаимодействия, а также создания перепутанных состояний. Увеличение числа ионов и переход к двумерной архитектуре позволит решать такие недоступные для классических компьютеров задачи как моделирование дробного квантового эффекта Холла (для этого потребуется двумерная ловушка с $6 \times 6 = 36$ ионами).



Микрофотография ионной ловушки. C1-C12 – управляющие электроды. Темным цветом выделены области между электродами шириной 5 мкм. Красным цветом указаны положения ионов. Каждый ион находится в “своей” потенциальной яме. Параметры ям могут изменяться независимо. Расстояние от ионов до поверхности чипа составляет 40 мкм.

1. *A.C.Wilson et al., Nature 512, 57 (2014).*

Безусловная квантовая телепортация твердотельных кубитов на макроскопическое расстояние

Для телепортации квантового бита (кубита) из пункта А в пункт В используют перепутанное состояние двух вспомогательных кубитов, “поровну распределенное” между отправителем и получателем. Сначала в пункте А выполняют совместное измерение над системой “кубит + запутанное состояние”. Затем о результатах этого измерения по классическому каналу сообщают в пункт В. Используя полученную информацию, получатель проводит соответствующее преобразование “своей половинки” запутанного состояния и тем самым воссоздает кубит, уничтоженный в А при измерении. Недосток такого подхода заключается в вероятностном характере телепортации (может получиться, а может и нет) из-за “недостаточной перепутанности” вспомогательного состояния. В работе [1] (Нидерланды, Великобритания, США) о запутанности электронных спинов двух NV-центров в алмазе, удаленных друг от друга на 3 м, судили по интерференции испущенных ими фотонов. Лишь убедившись в строгой перепутанности этого вспомогательного состояния, осуществляли телепортацию кубита, носителем которого служил ядерный спин одного из ближайших к NV-центру атомов азота. Авторы полагают, что спиновые кубиты в алмазе являются основными кандидатами для практической реализации квантовых информационных сетей и квантовых вычислительных устройств на их основе.



В предыдущих экспериментах телепортация твердотельных кубитов осуществлялась лишь с определенной вероятностью, что в большинстве случаев приводило к потере телепортируемого кубита. В работе [1] телепортацию проводили только после подтверждения запутанности вспомогательного состояния, в результате чего каждая попытка была успешной.

1. W.Ptiff et al., *Science* 345, 532 (2014).

НАНОМАТЕРИАЛЫ

Осаждение наночастиц в дыхательной системе при использовании бытовых спреев

В последнее время на рынке появляется все больше бытовых товаров, продуктов питания, содержащих наноматериалы. (см. ПерсТ [1, 2]). Вопросам обеспечения их безопасности для здоровья человека уделяется большое внимание. Учёные из США впервые количественно оценили ингаляционную дозу наноматериалов (НМ) при использовании в быту спреев [3]. Было исследовано пять пар продуктов. В каждую пару включили наноспрей (по информации производителя изготовленный с использованием нанотехнологий) и обычный спрей аналогичного применения (в статье [3] вместо фирменных названий приведен состав продукта). Изучение распыленного вещества с помощью электронной микроскопии (ТЕМ) показало, что в трех наноспреях наночастицы отсутствуют, зато они были обнаружены во всех обычных спреях (см. таблицу). ТЕМ изображения наночастиц и агломератов в спреях с серебром и дезинфицирующем спрее показаны на рис. 1, 2.



Продукт	Размер частиц (ТЕМ)	Примечания
Спрей с серебром		
Нано	Частицы 3÷65 нм, агломераты ~ 100нм	В обоих продуктах в основном агломераты; у наноспрея в среднем размер частиц меньше
Обычный	Частицы 3 нм и больше, агломераты 100÷500 нм	
Спрей дезинфицирующий для поверхности		
Нано	70÷200 нм	У наноспрея очень низкий уровень агломерации; у обычного спрея большинство частиц – агломераты из 2-3 нм частиц, но есть крупные агломераты >100 нм
Обычный	Сферические частицы меньше 100 нм (агломераты из 2-3 нм частиц)	
Спрей для волос		
Нано	Не обнаружены	В обычном спрее есть агломераты 2-3 мкм
Обычный	Сферические частицы 16÷100 нм и агломераты до 700 нм	
Косметический спрей для лица		
Нано	Не обнаружены	В обычном спрее есть очень крупные частицы более 6 мкм
Обычный	80 нм ÷ 6 мкм	
Спрей для кожи увлажняющий "туман"		
Нано	Не обнаружены	В обычном спрее есть очень крупные частицы более 2,5 мкм
Обычный	150 нм ÷ 2,5 мкм	

Когда жидкое средство распыляется вблизи зоны дыхания, образуются аэрозоли, содержащие наноматериалы (как наноразмерные частицы, так и их агломераты). Как выяснили авторы [3], это относится к обеим группам спреев.

Исследователей интересовали два вопроса – распределение вдыхаемых частиц по размерам и количество аэрозолей разных размеров, осаждаемых в определенных участках дыхательных путей.

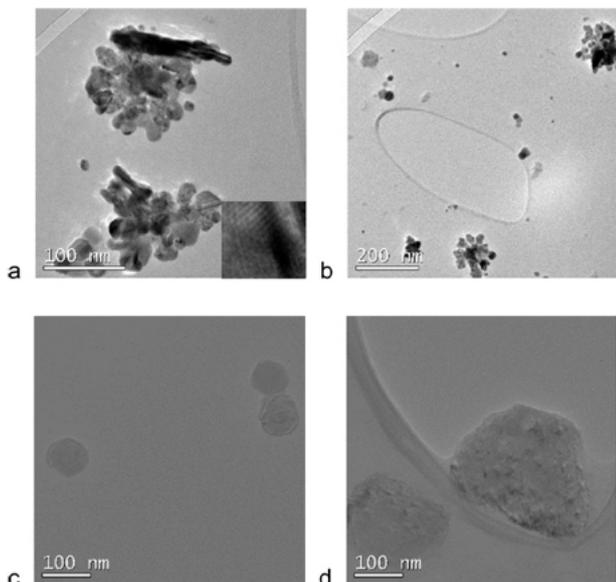


Рис. 1. ТЕМ изображение наноспрея с серебром (а, б) и дезинфицирующего наноспрея (с, д)

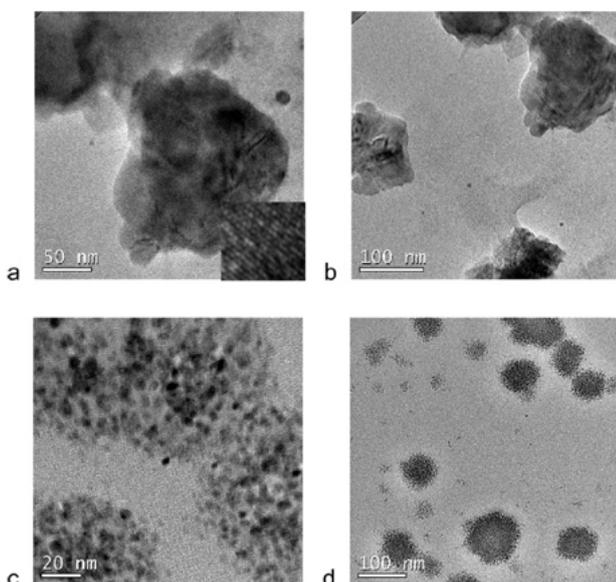


Рис. 2. ТЕМ изображение обычного спрея с серебром (а, б) и обычного дезинфицирующего спрея (с, д)

Для измерений как и в предыдущих исследованиях [4] использовали манекен головы человека. Его помещали в кабинет биобезопасности класса 2. Продукты распыляли вблизи головы, но не в лицо. В ноздри головы были вставлены 2 трубочки, которые соединялись на выходе (рис. 3). Общий поток шел к приборам, измеряющим распределение частиц по размерам в диапазоне 14 нм÷20 мкм.

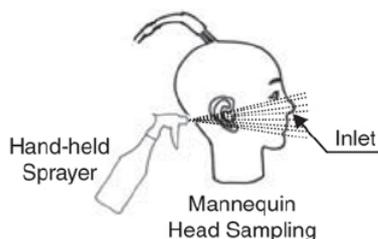


Рис. 3. Схема измерений [4]

Результаты использовали как входные данные для математической модели [5] в предположении сферической формы частиц и плотности 1 г/см³. По этой модели авторы количественно оценили дозу ингаляционного воздействия и осажденную дозу для частиц в диапазонах размеров 14÷100 нм (PM 01-0.014); 100 нм÷1 мкм (PM 1-0.1); 1÷2.5 мкм (PM 2.5-1); 2.5÷10 мкм (PM 10-2.5); 10÷20 мкм (PM 20-10). (Ингаляционная доза – масса аэрозолей, попадающих в дыхательную систему за время воздействия, осажденная доза – масса аэрозолей, осажденных в дыхательной системе за время воздействия) Осажденную дозу определяли отдельно для верхних дыхательных путей (НА), трахеобронхиальной области (ТВ) и альвеолярной области (АЛ).

Исследователи обнаружили отсутствие корреляции между наличием наночастиц в продуктах (по данным ТЕМ) и концентрацией наночастиц аэрозоля в воздухе. Фракция аэрозолей 14-100 нм образуется от *всех* изученных спреев, даже тех, в производстве которых не применяли наноматериалы (рис. 4). Авторы [3] отмечают, что с помощью современных аналитических приборов очень сложно определить наличие НМ в продуктах. Например, используя ТЕМ, они не обнаружили наночастицы в трех наноспреях. Это может быть связано с наличием большого числа ингредиентов, которые затрудняют визуализацию; с радиолизом под воздействием электронного пучка; с низким контрастом наночастиц.

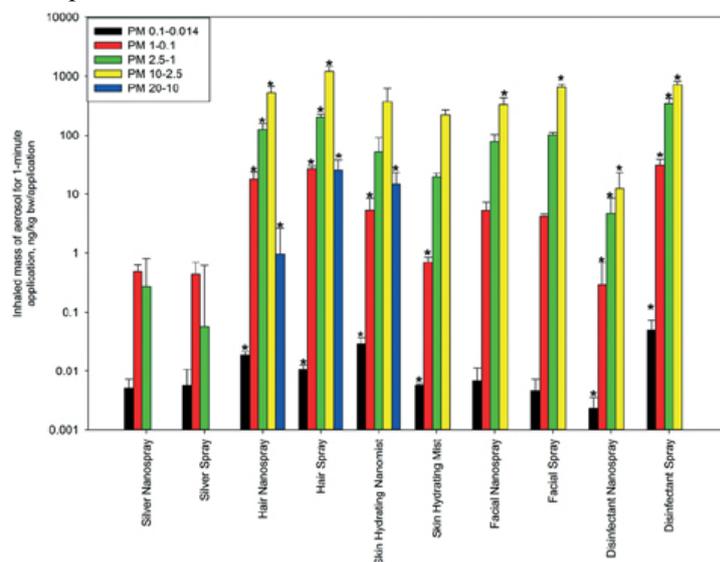


Рис. 4. Ингаляционная доза от 10 продуктов для различных размерных фракций частиц (нг на кг массы тела за 1 мин применения)

Уровни ингаляционного воздействия и осажденной дозы аэрозолей при использовании разных спреев очень сильно отличаются. Суммарная ингаляционная доза меняется в диапазоне от 0.5 до 1450 нг на кг массы тела за 1 минуту воздействия, а осажденная – от 0.1 до 1335 нг/кг. В 7 из 10

продуктов преобладает ингаляционная доза фракции 2.5-10 мкм (рис. 4). В основном частицы осаждаются в верхних дыхательных путях – 52.4-88.4% по массе, на долю трахеобронхиальной области приходится всего 4.6-7.3 %, а в альвеолярной области осаждаются 7.0-40.4% (рис. 5). Спреи с преобладанием наночастиц (по данным TEM), например оба спрея с серебром, дают самую низкую ингаляционную дозу, как суммарную, так и в нанодиапазоне, но относительное осаждение в альвеолярной области для них существенно выше, чем для остальных спреев (рис. 5).

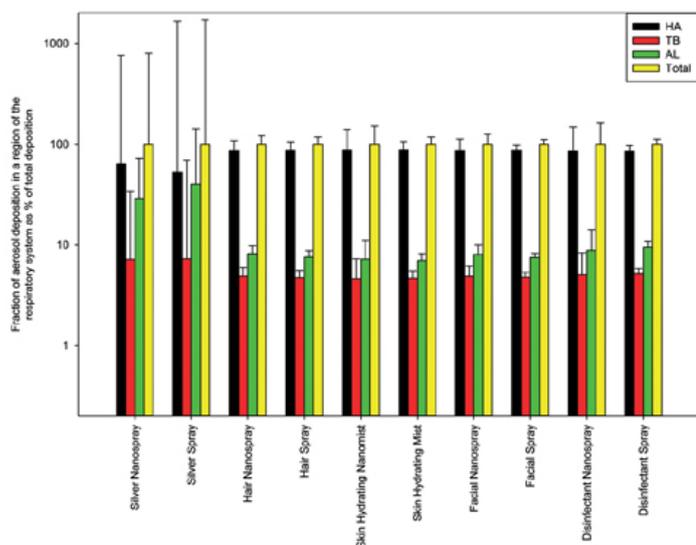


Рис. 5. Доля аэрозолей, осажденных в разных областях дыхательной системы, в процентах от суммарной осажденной дозы.

Количественная оценка ингаляционной дозы, представленная в работе [3], поможет разработать более безопасные продукты, минимизировать генерацию частиц нежелательных размеров. Однако разобраться в сложной картине воздействия аэрозолей, образующихся при распылении бытовых наноспреев, можно только при наличии полной информации о наноматериалах в исходном составе, которую обязательно должны предоставлять производители.

О. Алексеева

1. [ПерсТ 19, вып. 5, с.5 \(2012\).](#)
2. [ПерсТ 19, вып. 4, с.4 \(2012\).](#)
3. Y. Nazarenko et al., *Environ. Sci. Nano*, **1**, 161 (2014).
4. Y. Nazarenko et al., *Sci. Environ. Epidemiol.*, **21**, 515 (2011).
5. Y. Nazarenko et al., *J. Nanopart. Res.*, **14**, 1 (2012).

СПИНТРОНИКА

Спиновый эффект Пельтье

Вслед за спиновым эффектом Холла и спиновым эффектом Зеебека инструментарий спинтроники пополнился еще одним аналогом классических явлений электроники – спиновым эффектом Пельтье [1]. Группа голландских ученых продемонстрировала возникновение потока тепла, вызванного поляризованным по спину током (рис. 1).

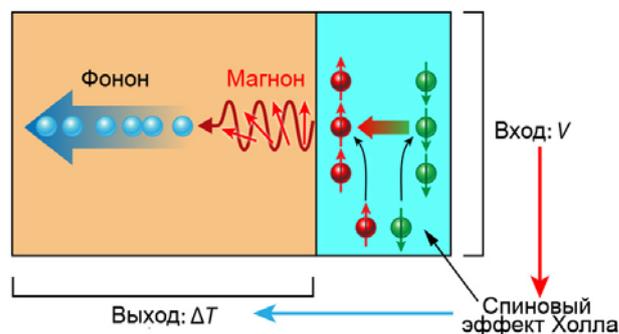


Рис. 1. Спиновый эффект Пельтье в системе из слоев железо-иттриевого граната (показан оранжевым) и платины (показана голубым): электрический ток в металле порождает неравновесную концентрацию спин-поляризованных электронов на границе с пленкой граната за счет спинового эффекта Холла. В диэлектрике спиновый ток переносится магнонами, которые взаимодействуют с фононами, порождая поток тепла и перепад температур ΔT .

Справедливости ради надо отметить, что новооткрытый эффект не первый из числа термоэлектрических явлений в спинтронике, поскольку он является обратным к открытому ранее спиновому эффекту Зеебека (любопытно, что даже сам Зеебек первоначально приписывал свой эффект к магнитным явлениям). Спиновый эффект Зеебека - это возникновение поляризованного по спину электрического тока в металле под действием потока тепла от прилегающего магнитного слоя [2]. Необходимость в обнаружении обратного эффекта следовала из самой симметрии природы (в данном случае, из соотношения взаимности Онзагера), и теперь можно говорить, что молодая отрасль “спиновой калоритроники” прочно стала на обе ноги.

Для создания спинового тока ученые воспользовались спиновым эффектом Холла – поперечным сносом электронов с различной спиновой поляризацией в противоположные стороны при протекании электрического тока в немагнитном проводнике (роль которого в данном случае играла пластинка из платины). Необычным для спиновой электроники оказался выбор магнитного материала (пленка железо-иттриевого граната), не проводящего электрический ток. Это, однако, не мешает ему проводить спиновый ток, поскольку в случае диэлектрика роль переносчика спина выполняют не свободные электроны, а спиновые волны. Обмен энергией между магнонами и фононами вызывает поток тепла, который удалось измерить. Этот эффект едва уло-

вим на фоне обычного джоулева тепла выделяющегося в соседнем слое платины, однако характерной особенностью спинового эффекта Пельтье является изменение направления теплового потока при изменении намагниченности в магнитном слое, что позволяет применять разностные методы для его обнаружения. Как можно судить по таким экспериментальным ухищрениям, речь о создании портативных холодильников на спиновом эффекте Пельтье не идет, но обнадеживает тот факт, что перепад температур можно наращивать за счет увеличения толщины магнитного слоя. Это невозможно в обычном эффекте Пельтье, относящемся к разряду контактных явлений.

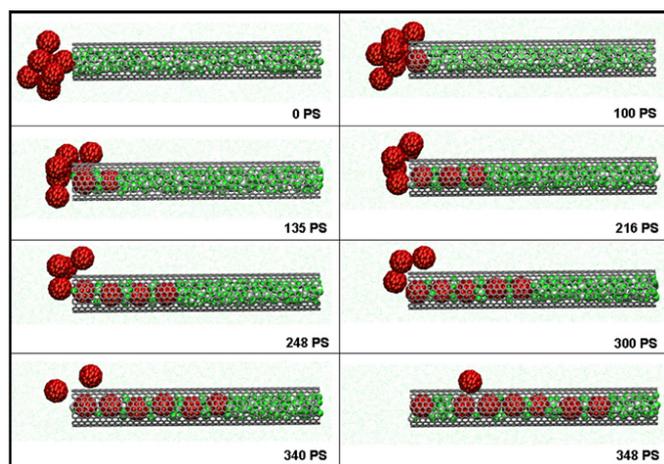
А. Пятаков

1. J. Flipse et al., *Phys. Rev. Lett.* **113**, 027601 (2014).
2. K. Uchida et al., *Nature* **455**, 778 (2008).

ФУЛЛЕРЕНА И НАНОТРУБКИ

Фуллеренам вход свободный

Для быстрого заполнения нанотрубки фуллеренами достаточно выбрать правильный растворитель. К такому выводу пришли китайские исследователи после проведения серии молекулярно-динамических расчетов по внедрению молекул C_{60} в одностенную углеродную нанотрубку в присутствии сверхкритического CO_2 [1]. Результаты компьютерного моделирования показали, что в среде сверхкритического CO_2 отдельные фуллерены формируют молекулярные кластеры, которые легко связываются с концом углеродной нанотрубки, а затем, один за другим покидая кластер, самопроизвольно инкапсулируются внутрь. При этом первоначальный размер агрегата влияет на плотность и скорость заполнения.



Моментальные снимки процесса инкапсуляции семи фуллеренов C_{60} внутрь углеродной нанотрубки в присутствии сверхкритического CO_2 .

Так, семь молекул кластера $(C_{60})_8$ проникают в нанотрубку за 348 пс (см. рис.), при этом внедрение первого фуллерена происходит за 100 пс. Более крупным системам требуется большее время. На-

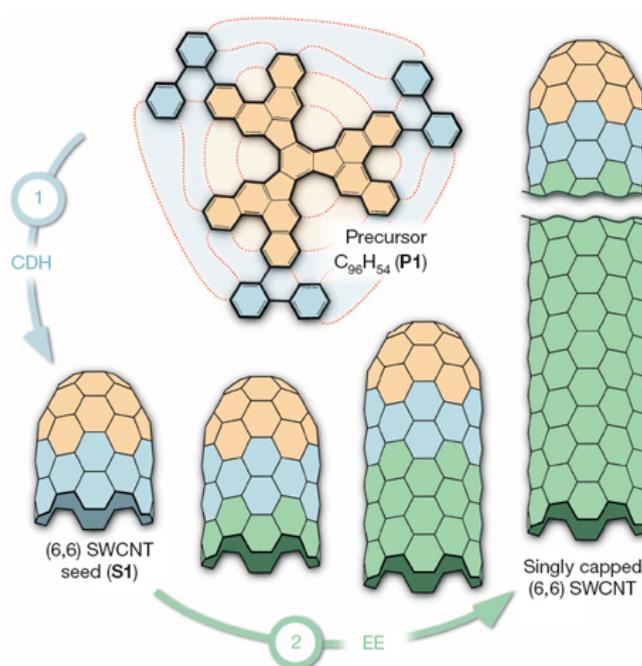
пример, лишь четыре фуллерена кластера $(C_{60})_{13}$ “закатываются” в нанотрубку за 972 пс, а остальные адсорбируются на ее поверхности. Стоит отметить, что в процессе инкапсуляции молекулы растворителя не покидают нанотрубку полностью, часть их остается между молекулами фуллерена. Авторы оговаривают отдельно, что аналогичные исследования были выполнены в присутствии другого растворителя – CS_2 . Однако в этом случае фуллереновый агрегат не образуется, и фуллерены не проникают внутрь нанотрубки. Будем надеяться, что дальнейшее, уже экспериментальное развитие предложенной в работе [1] методики позволит не только значительно упростить синтез фуллереновых “стручков” (пиподов), но и поможет в создании систем доставки лекарственных средств на основе углеродных нанотрубок.

М. Маслов

1. S. Liu et al., *Materials Lett.* **128**, 400 (2014).

Контролируемый синтез углеродных нанотрубок с заданной хиральностью

Электрические свойства одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) определяются их диаметром и ориентацией шестиугольников из связей С–С относительно оси, которые в свою очередь однозначно характеризуются парой неотрицательных целых чисел (n,m) , называемых индексами хиральности. В зависимости от значений этих индексов ОУНТ могут быть либо металлическими, либо полупроводниковыми, причем в последнем случае ширина запрещенной зоны варьируется от 1 мэВ до 1.5 эВ. Металлические ОУНТ могут играть роль соединительных контактов в наноэлектронных устройствах, а полупроводниковые – использоваться в транзисторах и детекторах излучения.



Схематическая иллюстрация процесса синтеза нанотрубок (6,6).

Изготовление ОУНТ с наперед заданной хиральностью – весьма непростая и пока нерешенная задача. Какой бы из известных методов ни использовался, на выходе всегда получается смесь ОУНТ с 5-50 различными (n,m), поэтому приходится прибегать к сложным процедурам отделения “нужных” ОУНТ (центрофугирование, электрофорез и пр.), опять же без гарантии успеха. Абсолютно “монокхиральные” ОУНТ впервые изготовлены исследователями из Швейцарии и Германии [1]. Используя полициклические молекулы $C_{96}H_{54}$ в качестве затравок, авторы [1] провели их циклодегидрогенизацию и получили в итоге ультракороткие ОУНТ (6,6) кресельного типа, закрытые с одной стороны “шапками” (см. рис.). Дальнейший рост ОУНТ до длины несколько сотен нанометров осуществлялся на платиновой подложке при температуре $500^{\circ}C$ в присутствии этанола как источника атомов углерода. Рамановская спектроскопия подтвердила “монокхиральность” этих ОУНТ. Пока не ясно, удастся ли подобрать органические молекулярные затравки для селективного роста ОУНТ с другими индексами хиральности.

Л. Опенов

I. J.R.Sanchez-Valencia et al., Nature 512, 61 (2014).

Электрохимический конденсатор переменного тока на основе углеродных наноструктур

Непрерывно возрастающий интерес к проблеме накопления и хранения электрической энергии обусловлен неравномерным характером нагрузки на электростанции, а также развитием автомобилестроения на основе экологически более приемлемых гибридных двигателей. Наиболее простой системой для накопления и хранения энергии является диэлектрический конденсатор, в котором электрическая энергия запасается в результате поляризации, вызванной накоплением поверхностных зарядов. Подобные системы способны работать в высокочастотном режиме, однако удельное количество запасаемой ими энергии сравнительно невелико. Другой подход к запасанию энергии реализуется в аккумуляторных батареях, где заряженные частицы, попадая на электроды, участвуют в химических реакциях, сопровождаемых выделением (поглощением) энергии. Хотя процессы зарядки и разрядки таких систем происходят гораздо медленнее, чем в случае диэлектрических конденсаторов, они способны запасать на несколько порядков большее количество энергии, поскольку при этом используется не поверхность, а объем системы. Такие системы, как суперконденсаторы и электролитические конденсаторы занимают по своим свойствам и рабочим характеристикам промежуточное положение между электростатическими конденсаторами и аккумуляторными батареями. Так, в суперконденсаторах,

структура которых аналогична структуре аккумуляторов, энергия запасается в виде электрического поля, как это имеет место в диэлектрических конденсаторах.

Наиболее подходящим материалом для электрохимических конденсаторов является наноструктурированный углерод, который отличается низкой стоимостью, доступностью и электрохимической стабильностью. В коммерческих суперконденсаторах в качестве электродов используется активированный уголь, обладающий пористой структурой и аномально высокой удельной поверхностью (до $2000 \text{ м}^2/\text{г}$). Это обеспечивает высокие величины удельной электрической и сорбционной емкости, однако такие показатели достигаются ценой более медленного проникновения ионов в поры материала для электродов и, соответственно, снижения скорости зарядки/разрядки. По той же причине работа таких суперконденсаторов возможна лишь при частотах не выше нескольких герц, т. е. практически в режиме постоянного тока. В связи с этим многие лаборатории прилагают усилия, направленные на преодоление указанной проблемы. Существенный шаг в данном направлении предпринят группой исследователей из Японии и Англии [1], которые использовали в качестве электрода вертикально ориентированные двумерные углеродные нанопластины, выращенные на поверхности металлического коллектора.

Для роста вертикально ориентированных двумерных углеродных нанопластин использовали установку химического осаждения паров в плазме СВЧ разряда (MPECVD). Процесс проводили в вертикально расположенной кварцевой трубке диаметром 5 см и длиной 24 см. СВЧ с частотой 2.45 ГГц мощностью 500 Вт подводили по волноводу. Наряду с этим через плоскопараллельные круглые электроды к реактору подключали постоянное напряжение смещения. В результате прохождения через камеру постоянного и СВЧ тока газ нагревался, что приводило к разложению углеродосодержащих молекул. В качестве подложки использовали фольгу Ni или Cu. Рост углеродных нанопластинок проводили в течение 10 мин при прокачивании через камеру смеси $H_2 : CH_4$ при давлении 1.5 мТорр со скоростью $20 : 20 \text{ см}^3/\text{с}$ (в пересчете на нормальные условия). При этом в течение первых 2 мин роста напряжение смещения повышали от 100 до 200 В. В результате на поверхности металлической подложки образовывалась трехмерная пористая структура, содержащая вертикально ориентированные графеновые хлопья шириной около 1 мкм и толщиной 10 – 20 нм. В целях сравнения был изготовлен также электродный материал на основе обычного активированного угля, обладающего низким электрическим сопротивлением.

Для изготовления электрохимического конденсатора использовали полученные вышеописанным спо-

собою электроды площадью 1 см², разделенные слоем целлюлозы толщиной 25 мкм. В качестве электролита использовали 1М раствор тетрафторбората тетраэтиламмония (TEABF₄) в пропиленкарбонате. Отдельная ячейка имела форму диска, напоминающего монету. Электрохимические характеристики конденсатора измеряли с помощью стандартного оборудования. Измерения показали, что, в отличие от электрохимического конденсатора на основе активированного угля, имеющего прямоугольную форму вольтаммограммы лишь при низкой скорости изменения напряжения (менее 0.1 В/с), вольтаммограммы ячеек на основе нанопластинок сохраняют прямоугольную форму при скоростях изменения напряжения до 50 В/с, а их удельная емкость примерно в 10 раз выше соответствующего параметра коммерческого электролитического конденсатора. При этом окно напряжений остается относительно узким (1 – 1.1 В). Важной особенностью изготовленных ячеек является постоянство электрической емкости при изменении частоты напряжения. Это указывает на доступность всей поверхности пористого электрода для ионов электролита, независимо от частоты изменения напряжения.

А. Елецкий

I. P.Hiralal et al., J. Nanomaterials 2014, 619238 (2014).

КОНФЕРЕНЦИИ

Advances in Functional Materials, June 29 - July 3, 2015, Stony Brook University, USA

Topics

The conference aims to encompass a large number of topics on the field of functional materials. Topics of interest include, but are not limited to:

- Functional Bio-materials and Sensors
- Advanced Catalyst Materials
- Hybrid and Polymeric Materials
- Ceramics and Composites Materials
- Carbon Based Materials
- Advanced Nuclear Materials
- Theoretical/Modeling/Computer Simulations of Functional Materials
- Functional Materials for Energy Storage and Conversion Devices
- Functional Materials for Environment
- Materials Development for Electronic Devices
- Advances in 2D Materials
- Magnetic Materials
- Low Dimensional Materials
- Spectroscopy for Advanced Materials
- Materials Development for Artificial Photosynthesis
- Green Materials and Technologies for Sustainable Development
- Materials for Flexible Electronics
- Thin Films
- Nanofluids
- Others

The deadline for abstract submission is 30th November, 2014.

Web: <http://functionalmaterials.org/>

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

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

Научные редакторы К.Кугель, Ю.Метлин

В подготовке выпуска принимали участие О.Алексева, А. Елецкий, М.Маслов, Л.Опенев, А.Пятаков

Выпускающий редактор: И.Фурлетова

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