

В этом выпуске:

СВЕРХПРОВОДНИКИ

Фактор когерентности в купратных ВТСП

Отличительным признаком сверхпроводящего состояния является макроскопическая фазовая когерентность. В этом отношении сверхпроводники схожи со сверхтекучими жидкостями, но отличаются от последних наличием куперовских пар. Характеристики квазичастичных возбуждений в сверхпроводнике существенно зависят от внутренней структуры пар, что проявляется в усилении когерентности между процессами рассеяния $k_i \rightarrow k_f$ и $-k_i \rightarrow -k_f$. Математически это выражается в появлении у матричного элемента рассеяния так называемого фактора когерентности (или когерентного множителя) $G(k_i, k_f)$, чувствительного к фазе сверхпроводящего параметра порядка Δ и к симметрии рассеивающего потенциала относительно обращения времени. В сверхпроводниках с s -волновой симметрией Δ фактор когерентности приводит к ряду специфических эффектов, таких как максимум на температурной зависимости скорости релаксации ядерного спина чуть ниже T_c . В анизотропных же сверхпроводниках влияние фактора когерентности подавлено сильной (в купратных ВТСП – d -волновой) зависимостью Δ от k , и поэтому экспериментальное наблюдение связанных с ним эффектов затруднено.

В работе [1] японские и американские ученые разработали методику, позволяющую судить о зависимости фактора когерентности анизотропного сверхпроводника от импульса по изменению туннельных спектров в магнитном поле. Магнитные вихри являются центрами рассеяния квазичастиц, и поэтому в их окрестности этот фактор проявляется более отчетливо. Свою методику авторы [1] применили к ВТСП $\text{Ca}_{2-x}\text{Na}_x\text{CuO}_2\text{Cl}_2$ с $x = 0.14$ и $T_c = 28$ К. Эксперимент проводили при $T = 1.6$ К и $H \leq 12$ Тл. Фурье-анализ спектров, полученных путем сканирования, показал, что фактор когерентности в ВТСП ведет себя, как ему и положено в d -волновом сверхпроводнике с узлами Δ (что, впрочем, и ожидалось). Интересным “побочным” результатом стало обнаружение при больших H целой области импульсного пространства (а не просто линий), в которой $\Delta=0$. Эта область расположена в окрестности “исходных” (при $H=0$) узлов Δ и увеличивается с ростом H . Полученные результаты согласуются с теоретическими предсказаниями (“эффект Воловика”). Развитую в [1] методику можно применить и к другим анизотропным сверхпроводникам (например, p -волновым и s^* -волновым). Ее можно также модифицировать для изучения фактора когерентности при рассеянии квазичастиц на обычных примесях выше T_c , что даст новую информацию о псевдощелевом состоянии ВТСП.

Л.Опенев

1. T.Hanaguri et al., *Science* **323**, 393 (2009).

И далее ...

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОЭЛЕКТРОНИКА

- 2 Деактивация доноров в кремниевых наноструктурах

А вместо сердца – атомный мотор?

- 3 Нанотормовка аморфным металлом

СПИНТРОНИКА

- 3 Память на магнитных поляронах

СНОВА К ОСНОВАМ

- 4 Сила трения в наномасштабе

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

- 4 Новая технология массового производства графена

- 5 Краевые эффекты в графене

Углеродные нанотрубки и нейроны

- 7 Подавление металлической проводимости однослойных углеродных нанотрубок

- 8 Частицы катализатора влияют на ток эмиссии нанотрубок

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

- 10 Квантовая механика бизнес-объектов

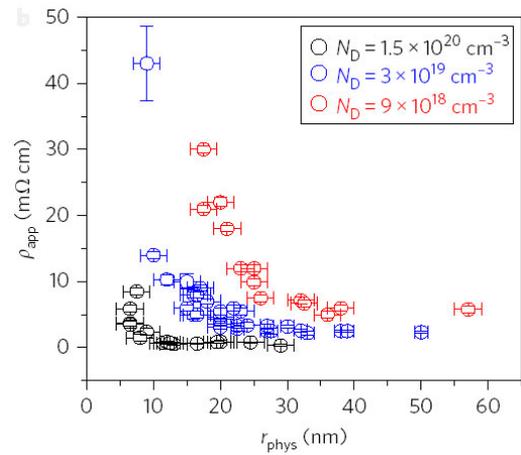
КОНФЕРЕНЦИИ

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Деактивация доноров в кремниевых наноструктурах

Важнейшей характеристикой полупроводников является концентрация n свободных носителей заряда. В большинстве случаев она контролируется легированием полупроводника неизовалентными примесями. При данной температуре величина n определяется расстоянием ΔE от находящегося внутри запрещенной зоны примесного уровня до края соответствующей разрешенной зоны (дна зоны проводимости для донорных примесей и потолка валентной зоны для акцепторных) – $n \sim \exp(-\Delta E/2k_B T)$. Величина ΔE , в свою очередь, зависит от характеристик полупроводника и в первом приближении дается формулой $\Delta E \approx m^* e^4 / 2 \varepsilon^2 \hbar^2$, где m^* – эффективная масса носителя, ε – диэлектрическая проницаемость полупроводника. Так как обычно $m^* \sim 0.1$ и $\varepsilon \sim 10$, то $\Delta E \sim 0.01$ эВ, и поэтому при комнатной температуре большинство примесей ионизованы. Теория, однако, предсказывает, что в полупроводниковых нанопроводах с диаметром ~ 10 нм величина ΔE может быть больше (а значит, концентрация носителей – меньше) из-за большой удельной площади границы раздела нанопровода с окружающим его материалом, из-за низкой величины ε последнего, а также в силу ряда других причин.

В статье [1] сотрудники лаборатории ИВМ в Цюрихе представили результаты экспериментальных исследований зависимости удельного сопротивления ρ кремниевых нанопроводов от их радиуса r (величина ρ тем больше, чем меньше концентрация носителей). Значительное увеличение ρ наблюдалось при величинах r , существенно превышающих те (< 5 нм), при которых основную роль начинают играть эффекты квантового ограничения и/или поверхностной сегрегации примесей. Это справедливо в очень широком диапазоне концентраций фосфора (донор): уменьшение r до 15 нм приводит к росту ρ примерно в 2 раза (рис. 1). Проанализировав полученные результаты, авторы [1] пришли к выводу, что основной причиной увеличения ρ является деактивация доноров из-за различия диэлектрических проницаемостей нанопровода ε и его окружения ε_r . Экспериментальные данные хорошо описываются теоретической зависимостью энергии ионизации донорных примесей от r , $\Delta E \approx \Delta E_0 + \text{const}/r$, где ΔE_0 – энергия ионизации доноров в объемном кремнии, а значение константы зависит от ε и ε_r (были изучены нанопровода, находящиеся в контакте с воздухом и покрытые Al_2O_3 , то есть при $\varepsilon_r = 1$ и 4-5, соответственно). Этот эффект надо обязательно учитывать при разработке новых нанoeлектронных устройств: полевых транзисторов, биодатчиков, термоэлектрических наноприборов и др.



Зависимости удельного сопротивления кремниевых нанопроводов от их радиуса при различных концентрациях донорных примесей фосфора.

Л. Опенов

1. M.T.Bjork et al., *Nature Nanotech.* 4, 103 (2009).

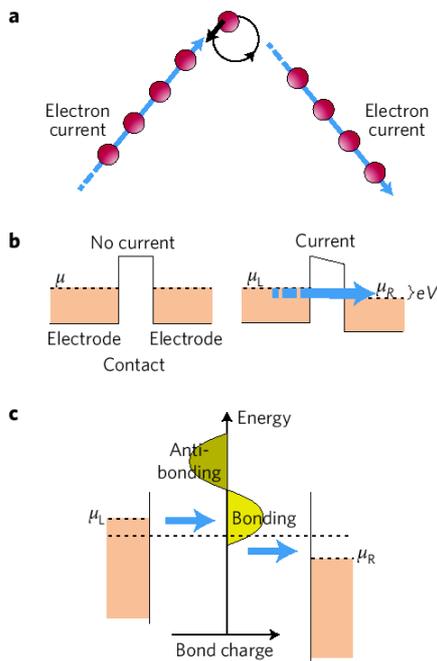
А вместо сердца – атомный мотор?

Для численного моделирования движения большого количества атомов используют, как правило, метод молекулярной динамики. Действующие на каждый атом силы определяются электронной структурой рассматриваемой системы. Обычно используется адиабатическое приближение: предполагается, что при смещении атомов электроны мгновенно “подстраиваются” под новую атомную конфигурацию. При этом, если система изолирована от внешнего окружения, то ее энергия в процессе эволюции сохраняется, поскольку межатомные силы являются консервативными. А что будет, если через систему потечет электрический ток? Движение атомов при наличии тока называют электромиграцией. Она представляет собой одну из основных проблем микроэлектроники, поскольку приводит к нарушению соединений между элементами интегральных схем. И эта проблема будет только усугубляться по мере перехода с микро- на наноразмер.

До недавнего времени не было однозначного ответа на вопрос, являются ли индуцированные током силы консервативными. В статье [1] ученые из Северной Ирландии представили формальное теоретическое доказательство того, что они таковыми не являются. Этот вывод подтверждается данными компьютерного моделирования. В отличие от стандартных численных алгоритмов, в [1] учитывалась динамика отклика электронов на смещения атомов. При наличии постоянного тока имеет место неравновесное заполнение электронных уровней, в результате чего заряд на атомных связях изменяется, теорема Гелмана-Фейнмана (о расчете межатомных сил путем усреднения по заполненным электронами состояниям) перестает выполняться, и сила, действующая на атомы со стороны тока, становится неконсервативной, то есть способной совершать работу. Круговое движение одного атома (см. рис.) или группы атомов приводит в итоге к передаче энергии

ПерсТ, 2009, том 16, выпуск 5

от электронной подсистемы к атомной, увеличивая энергию последней. Получается что-то типа “атомного мотора”. Теперь нужно учесть в расчетах джоулев нагрев (не мешает ли он работе “мотора”?) и, конечно, попытаться провести соответствующие эксперименты.



(a) Модель, рассмотренная в работе [1]. Электрический ток течет по изогнутой цепочке атомов. Атом, расположенный в области изгиба, является “динамическим” и при наличии тока движется по окружности диаметром около 0.005 нм.

(b) Схематическое изображение туннельного контакта в отсутствие и при наличии на нем напряжения. μ_L и μ_R – химический потенциал в левом и правом электродах, соответственно.

(c) Неравновесное заполнение электронами связывающих и антисвязывающих орбиталей приводит в конечном итоге к движению атомов под действием постоянного тока.

Л.Опенев

I. D.Dundas et al., Nature Nanotech. 4, 99 (2009).

Нанотформовка аморфным металлом

Нанесение рельефа давлением, штамповка и формовка на субмикронной шкале широко используются в производстве CD, DVD и пр. Чтобы перейти к наноразмерным (< 100 нм) масштабам требуется найти для пресс-форм недорогие и долговечные материалы, которые не были бы такими хрупкими как кремний и другие полупроводники и не содержали бы крупных зерен, как металлы. Специалисты из Yale University (США) [1] предложили изготавливать пресс-формы из аморфных металлов (так называемых металлических стекол), которые отличаются высокой твердостью, однородностью и изотропией, что делает их пригодными для работы с полимерами и другими металлическими стеклами, имеющими более низкую температуру размягчения. Такие формы были с успехом использованы в [1]

Перст, 2009, том 16, выпуск 5

для нанесения наноразмерного узора. Нанотформовка, конечно, вряд ли полностью вытеснит обычную литографию, но занять определенный нанотехнологический ареал обитания ей вполне по силам.

I. G.Kumar et al., Nature 457, 868 (2009).

СПИНТРОНИКА

Память на магнитных поляронах

Сотрудники North Carolina State University (США) предложили устройство энергонезависимой магнитной памяти, основанное на магнитных поляронах [1]. Структура и два логических состояния ячейки памяти приведены на рисунке.

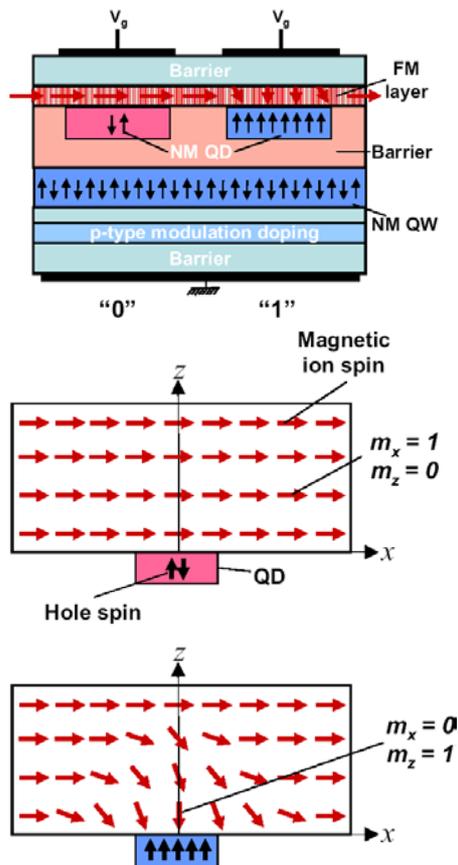


Рис. Два логических состояния ячейки памяти, отличающиеся направлением спинов дырок в квантовых точках (QD) и спинов магнитных ионов в ферромагнитном слое (FM).

Квантовые точки соприкасаются с тонким ферромагнитным слоем. Дырки в них поставляются из квантовой ямы, находящейся в антиферромагнитном состоянии. Состояние «0» характеризуется тем, что в квантовой точке находится мало дырок. По отношению к спинам они имеют то же самое антиферромагнитное состояние, что и в квантовой яме, откуда они пришли. В этом состоянии спины магнитных ионов не возмущены. В логическом состоянии «1» происходит сильное обменное взаимодействие дырок с магнитными ионами через границу раздела. Возникает коллективный магнитный полярон, в котором спины дырок и магнитных ионов направлены противоположно друг другу. Энергетически становится выгодным наполнение квантовой

точки дырками. Этот процесс ограничен нарастающей кинетической энергией дырок в квантовой точке, поскольку дырки являются фермионами.

Оценки авторов показывают, что устройство может работать при комнатной температуре и время памяти достаточно для практических применений.

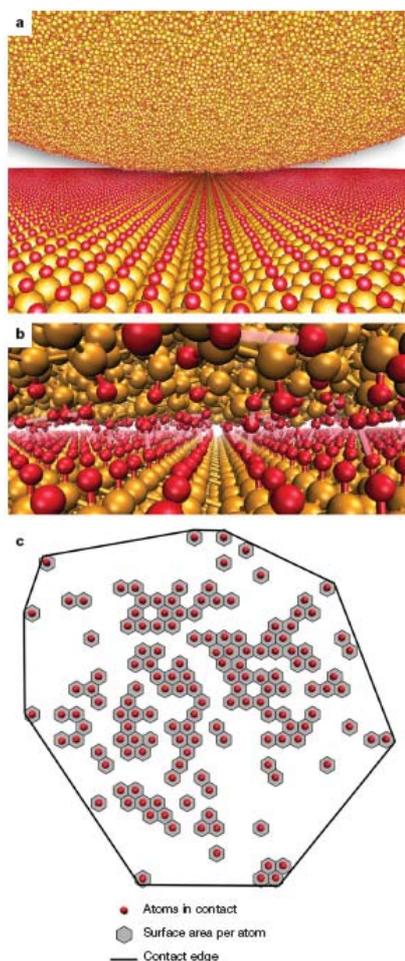
В.Вьюрков

1. H. Enaya et al. *J. Appl. Phys.* **104**, 084306 (2008).

СНОВА К ОСНОВАМ

Сила трения в наномасштабе

Говорят, что сухое трение является самым «скользким» вопросом физики. Действительно, законы, его описывающие, неоднократно подвергались ревизии. Очередная попытка примирить различные подходы и разобраться в том, как при контакте двух тел на атомном уровне рождается сила трения, предпринята в [1].



Схематическое изображение контакта между сферой из углерода и поверхностью алмаза, поверхность которого пассивирована водородом: *a* - общий вид, желтые атомы — углерод, красные — водород; *b* - сечение контактирующих поверхностей: показаны ковалентные связи между молекулами, а также силы отталкивания (обозначены розовым); *c* - контактирующие атомы (серые шестиугольники) и контур микрошероховатости [1].

Классический закон сухого трения, впервые открытый еще Леонардо да Винчи, а потом снова переоткрытый Кулоном и Амонтоном, гласит, что сила трения пропорциональна весу тела $F_{тр} \sim P$ и не зависит от площади контакта тел. В 50-х годах прошлого века в эту школьную формулировку было внесено важное уточнение: сила не зависит от *макроскопической* площади контакта, в то время как в действительности *на микроуровне* контактируют шероховатости, совокупная площадь которых $\sum S_{шер}$ значительно меньше видимой, а от нее сила сухого трения зависит прямо пропорционально: $F \sim \sum S_{шер}$ [2]. Как в этом случае быть с зависимостью от веса

тела? Если предположить, что площадь контактирующих шероховатостей пропорциональна весу тела, тогда макро- и микроскопическая трактовки согласуются между собой. Однако как показано еще одним классиком науки Г. Герцем [3], площадь контакта двух упругих сфер должна зависеть от веса по сублинейному закону $S \sim P^{2/3}$.

Возникающую несостыковку двух подходов разрешают авторы [1], рассматривая контакт тел уже не в микро-, а в наномасштабе. В таком случае можно уже говорить об отдельных контактирующих атомах, совокупная площадь которых напрямую не связана с площадью шероховатости, зато зависит линейно от веса груза, прижимающего поверхности друг к другу, то есть мы снова возвращаемся к классическому закону Кулона-Амонтона.

Данная картина подтверждается результатами численных расчетов модельной ситуации, в которой контактирует аморфная углеродная игла с радиусом кривизны единицы-десятки нанометров и алмазная поверхность. Обе поверхности пассивированы водородом, так что адгезией, вызванной короткодействующими силами химических связей, можно пренебречь.

При учете адгезии в модель необходимо включить, помимо близкодействующих сил отталкивания, также и далекодействующие силы Ван-дер-Ваальса. В этом случае эффективный вес увеличивается на величину P_{V-d-W} , обусловленную ван-дер-ваальсовским притяжением атомов, которая уже не связана с площадью контактов атомов прямой пропорциональностью. В результате зависимость силы трения от обычного веса становится сублинейной, но, все же, отличающейся от закона «двух третей» Герца. И, наконец, при больших давлениях и острине гладкой формы с радиусом кривизны в микрометровом диапазоне можно ожидать, что площадь соприкасающихся атомов будет стремиться к площади контактирующих шероховатостей, и зависимость силы сухого трения от веса примет вид $F \sim P^{2/3}$.

А. Пятаков

1. Yifei Mo et al., *Nature* **457**, 1116 (2009).
2. F.P.Bowden, D.Tabor, *The Friction and Lubrication of Solids* (Oxford:Clarendon, 1950).
3. H.Hertz, *J. Reine Angew. Math.* **92**, 156 (1881).

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

Новая технология массового производства графена

В работе [1] предложена новая технология массового производства графена – монослоя атомов углерода, обладающего целым рядом уникальных физических свойств и рассматривающегося в качестве одного из основных кандидатов в материалы нанoeлектроники. Эта технология основана на графитизации поверхности карбида кремния в атмосфере аргона. Все предыдущие попытки вырастить графен

на SiC оказались неудачными по той простой причине, что необходимый для графитизации нагрев образца осуществляли в вакууме. Это приводило либо к разупорядочению поверхности при высокой температуре (из-за разложения SiC и испарения Si), либо к подавлению диффузии атомов углерода – при низкой. В результате слой графена получался не сплошным, а распадался на отдельные блоки с характерными размерами от 30 до 200 нм. А использованная в [1] плотная атмосфера инертного газа (даже при близком к атмосферному давлении) препятствует сублимации Si при нагреве до температур, достаточных для формирования графена на поверхности. Карбид кремния является диэлектриком, поэтому не шунтирует текущий по графену электрический ток. Подвижность носителей в графене составила, по данным [1], около $2000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ при $T = 27 \text{ К}$ – значительно выше, чем в лучших образцах “графен-на-кремнии”, полученных ранее другими методами. Так как способы изготовления пластин SiC большого диаметра хорошо отработаны, то теперь и с графеном проблем, по-видимому, не будет...

1. K.V.Emtsev et al., *Nature Mater.* **8**, 203 (2009).

Краевые эффекты в графене

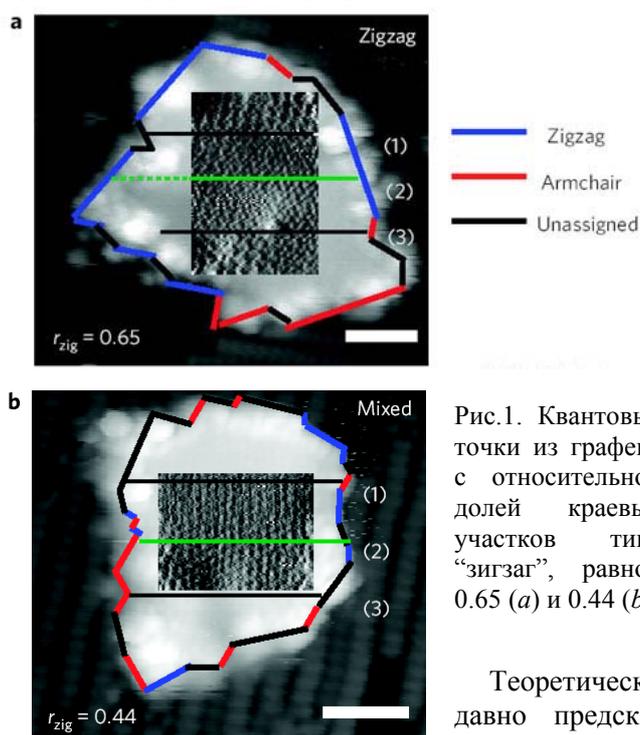


Рис.1. Квантовые точки из графена с относительными долями краевых участков типа “зигзаг”, равной 0.65 (a) и 0.44 (b).

Теоретически давно предсказано, что электронная структура квантовых точек и нанолент из графена существенно зависит от их размеров и от кристаллографической ориентации их краев, однако эти предсказания долго не удавалось подтвердить экспериментально. В статье [1] представлены результаты исследования различных наноструктур из графена (рис. 1), которые показывают, что теоретики правы. Так, например, квантовые точки с размерами 7-8 нм являются металлическими (рис. 2), что связано с наличием в них краевых состояний (ана-

лога поверхностных состояний в объемных образцах). В полупроводниковых квантовых точках ширина запрещенной зоны E_g зависит от их минимального поперечного размера L по закону $E_g = (1.57 \pm 0.21)/L^{1.19 \pm 0.15}$ (где E_g измеряется в эВ, а L – нм) – в полном соответствии с теоретической зависимостью $E_g = 1.68/L$. В нанолентах шириной 2-3 нм и длиной 20-30 нм, на краях которых удельная доля зигзагообразных участков больше, чем “кресельных”, величина E_g меньше, чем в нанолентах такой же ширины, но с “кресельными” краями. Полученные в [1] данные важны для проектирования нанoeлектронных устройств на основе графена.

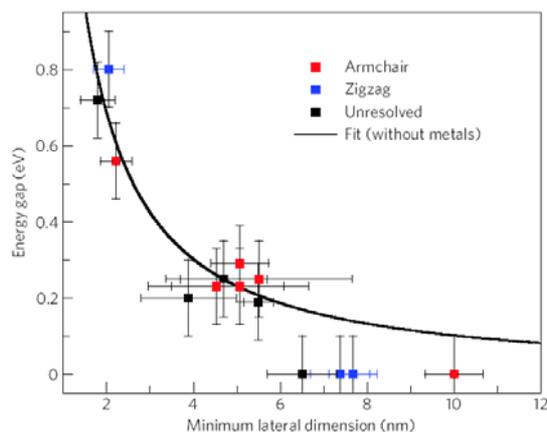


Рис.2. Зависимость ширины запрещенной зоны от минимального поперечного размера квантовой точки из графена с разной структурой краев.

1. K.A.Ritter, J.W.Lyding, *Nature Mater.* **8**, 235 (2009).

Углеродные нанотрубки и нейроны

Нейроинженерия – новая, быстро развивающаяся междисциплинарная наука, изучающая фундаментальные механизмы передачи сигналов и возможности управления реакциями центральной и периферической нервной системы. Она использует методы и достижения клинической и экспериментальной неврологии, нейрофизиологии, биофизики, кибернетики, компьютерной инженерии, материаловедения и, конечно же, нанотехнологий. Одна из основных задач – создание гибридных систем из живых и неживых элементов для внедрения имплантов, управляемых нервной системой с целью устранения ее нарушений. Для ее решения необходимо создать биосовместимый стабильный интерфейс нервной клетки и соответствующего неживого элемента. Результаты исследований, полученные в различных научных лабораториях, показывают, что углеродные нанотрубки (УНТ) могут быть использованы в нейроинженерии и для фундаментальных исследований поведения нервных клеток, и для практического применения - для изучения роста и организации нейронной сети, улучшения эффективности передачи сигналов в нервной системе, создания биосовместимого интерфейса, нанoeлектродов [1-3].

Структурно-функциональной единицей нервной системы является нервная клетка – **нейрон**. По оценкам, в нервной системе человека более 100 млрд. нейронов, которые связаны между собой в цепи. Типичный нейрон состоит из сомы, или тела клетки, содержащего ядро, и отростков, одного обычно неветвящегося – **аксона**, и нескольких ветвящихся – **дендритов** (рис.1). Аксоны и дендриты покрыты клеточной мембраной и еще одной или двумя оболочками. Тела нейронов образуют скопления (нервные центры и узлы), а аксоны и дендриты, объединяясь в общей оболочке, формируют нервы. По аксону импульсы идут **от** тела клетки к так называемым эффекторам (мышцам, железам) (рис.1а) или другим нейронам (рис.1б), а по дендритам – в тело клетки (от рецепторов или других нейронов). Соединение между аксоном одного нейрона и дендритом следующего – **синапс**. Передача импульса обусловлена электрическими и химическими возмущениями. Широко распространена мембранная теория: концентрации ионов (главным образом натрия и калия) вне нейрона и внутри него не одинаковы, поэтому нервная клетка в состоянии покоя заряжена изнутри отрицательно, а снаружи положительно, и на мембране клетки имеется разность потенциалов – так называемый «потенциал покоя». При раздражении нейрона некоторые из Na^+ - каналов открываются в точке стимуляции, ионы натрия входят внутрь клетки, снижая отрицательный заряд внутренней поверхности мембраны в области канала, – возникает «потенциал действия», то есть нервный импульс, который можно зарегистрировать.

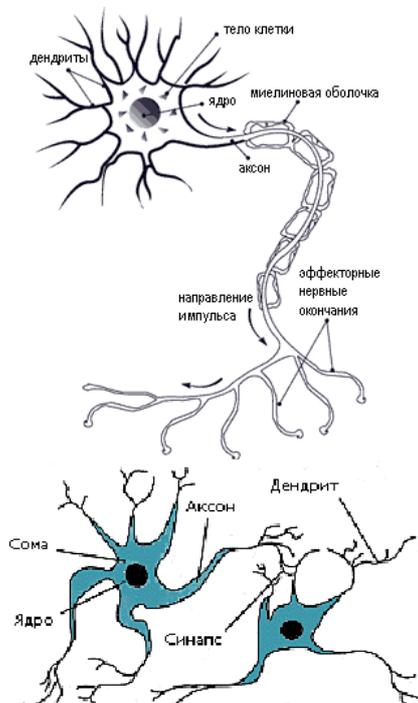


Рис.1 Схематические изображения нейронов. Несмотря на большой интерес нейрофизиологов, биологов и других исследователей к углеродным

нанотрубкам, детали взаимодействия нейрон – УНТ пока мало известны. Значительный прогресс в этой области достигнут в работах коллектива авторов из Италии и Швейцарии [1,2]. Ученые в течение 8-12 дней культивировали нервные клетки гиппокампа (*гиппокамп* – часть головного мозга) крыс на подложках из одностенных нанотрубок. Для получения подложек раствор нанотрубок осаждали на стекло, где после термообработки образовывалась механически прочная пленка толщиной 50-70 нм. Данные электронной микроскопии показали, что по всей подложке разрослись нейроны, имеющие размеры и морфологию, типичные для здоровых клеток. И не просто разрослись, а тесно соединились с нанотрубками (рис.2 А-Д)! Детальный анализ с помощью микроскопии более высокого разрешения выявил наличие плотного контакта мембраны нейрона с нанотрубкой (рис.2 Е-Ф), что очень важно для создания интерфейса нейронная ткань / внешнее устройство. Рост нейронов и образование функциональной сети на ОСНТ указывает на полную биосовместимость.

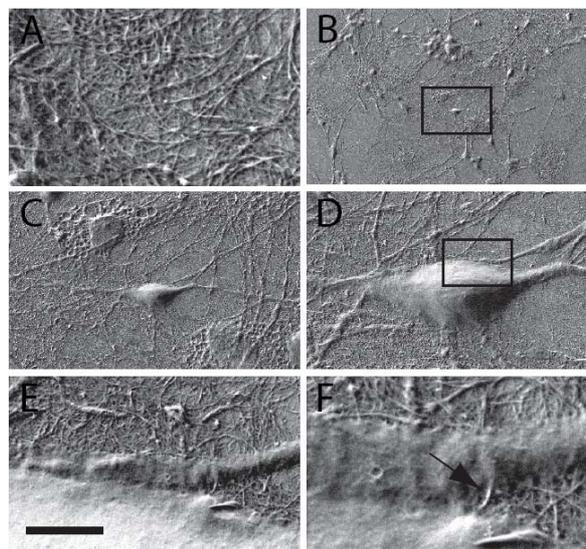


Рис.2. Микрофотографии нейронов на ОСНТ. (А) Подложка из ОСНТ. (В-Д) Рост нейронов в течение 10 дней на образце А. (Е,Ф) – детали областей, выделенных на рис.Д. Масштабная шкала (показана на Е): А – 1 мкм, В – 200 мкм, С – 25 мкм, D – 10 мкм, Е – 2 мкм, F – 450 нм.

Основной результат работы – в нейронах возникали отклики на внешнюю электростимуляцию, осуществляемую **через нанотрубки** с помощью подсоединенного к подложке Ag-электрода. Таким образом, нанотрубки не только хорошая поверхность для выращивания нейронной сети. Они могут способствовать повышению эффективности работы мозга благодаря передаче электрического сигнала по нанотрубке.

В последующих экспериментах ученые использовали как одностенные, так и многостенные нанотрубки [1]. Влияние УНТ на функции нейронов исследовали сравнивая данные для гиппокампальных клеток крыс, культивированных 8-12 дней на УНТ-

пленках и контрольных подложек. Материалами контрольных подложек служили оксид индия-олова ИТО, имеющий высокую электропроводность, и пептиды – не электропроводные, но самособирающиеся в нановолокна, похожие на нанотрубки. Были использованы стандартные электрофизиологические методы, которые позволили зарегистрировать заметное повышение синаптической активности для УНТ-образцов. Результаты подтвердили специфичность нанотрубок, так как ни высокая электропроводность первой контрольной подложки, ни нановолокнистая структура второй не помогли стимулировать нейроны. Далее авторы изучили, как нанотрубка может влиять на электрические свойства отдельного, изолированного от сети нейрона. На основании результатов измерений и математического моделирования они пришли к выводу, что нанотрубка может служить «цепью короткого замыкания» между телом нейрона и отростками, таким образом «приближая» к телу удаленные участки нейрона. Если это действительно так, то можно надеяться, что углеродные нанотрубки помогут не только устранить некоторые заболевания и нарушения нервной системы, но и смогут заметно повысить эффективность работы мозга.

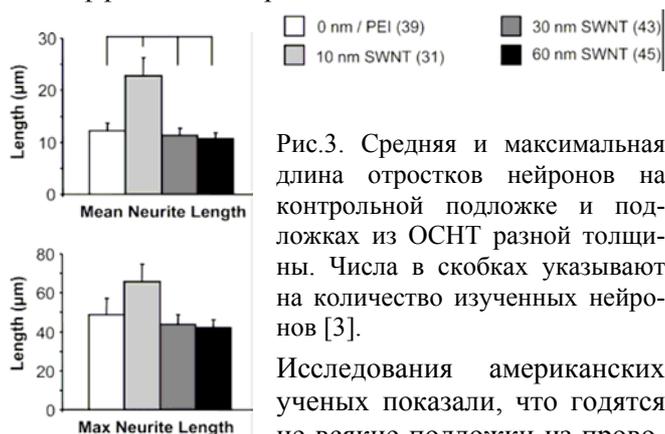


Рис.3. Средняя и максимальная длина отростков нейронов на контрольной подложке и подложках из ОСНТ разной толщины. Числа в скобках указывают на количество изученных нейронов [3].

Исследования американских ученых показали, что годятся не всякие подложки из проводящих УНТ [3]!

Оказывается, существует достаточно узкий диапазон электропроводности, оптимальный для эффективного развития нейронов. Авторы работы синтезировали ОСНТ, добавили полиэтиленгликоль (ПЭГ), способствующий их растворению и, соответственно, улучшающий биосовместимость, в УЗ-ванне получили однородную дисперсию и распылением нанесли на горячее покровное стекло однородную пленку. Изменяя толщину пленки, можно было контролируемым образом менять электропроводность. Материалы подложек толщиной 10, 30 и 60 нм имели удельную электропроводность 0,3; 28 и 42 См/см, соответственно. Для контроля использовали покровные стекла, покрытые неэлектропроводным полиэтиленмином (ПЭИ), который применяется в нейробиологии для активизации адгезии и роста клеток. Культуры гиппокампальных нейронов крыс выращивали на подложках в течение 3 дней. Нейроны имели флуоресцентную метку, и их рост можно было наблюдать с

помощью флуоресцентной и интерференционно-контрастной микроскопии. Цель исследований – понять, какую роль играет «пассивная» проводимость. Выяснилось, что разрастание нейронов на 30- и 60-нм ОСНТ-ПЭГ пленках не отличалось от контроля. А вот для подложки толщиной 10 нм общее разрастание отростков, длина всех ветвей заметно увеличились для каждого нейрона (рис.3). Эти наблюдения могут объяснить различия в результатах, полученных в ряде экспериментов с электропроводными подложками.

Авторы [3] пока не могут однозначно объяснить, почему наилучший рост нейронов наблюдается на пленке с определенной (низкой) проводимостью. Похожие результаты для другого типа клеток, культивированных на подложках из полипиррола с разной проводимостью, были ранее объяснены модификацией ионного транспорта через клеточную мембрану. Возможны и другие механизмы. Тем не менее, сделан важный вывод о влиянии электропроводности подложки на развитие нейронов.

О.Алексеева

1. G.Cellot et al., *Nature Nanotech.* **4**, 126 (2009).
2. A.Mazzatenta et al., *J. Neurosci.* **27**, 6931 (2007).
3. E.B. Malarkey *Nano Lett.* **9**, 264 (2009).

Подавление металлической проводимости однослойных углеродных нанотрубок

При синтезе углеродных нанотрубок (УНТ) стандартными методами, к числу которых относятся газовый разряд, лазерная абляция и химическое осаждение паров (CVD), образуется примерно треть нанотрубок, обладающих металлическими свойствами, в то время как остальные УНТ являются полупроводниками. Для практического использования УНТ необходимо либо научиться выделять нанотрубки с определенными электронными характеристиками, либо освоить методы управления этими характеристиками. Оба указанных подхода являются предметом активных исследований. Так, в Cornell Univ. (США) развит химический метод подавления металлической проводимости однослойных УНТ, основанный на использовании реакции циклического присоединения. Эффект подавления основан на механизме проводимости УНТ, который связан с существованием двойных связей в их электронной структуре. Разрыв двойной связи в результате реакции циклического присоединения приводит к локализации части электронов проводимости и тем самым к замене металлического характера проводимости на полупроводниковый.

В качестве исходного материала использовали однослойные УНТ, полученные в результате термокаталитического разложения СО высокого давления (HiPco). Образцы нанотрубок составляли разветвленную сетевую структуру, которую диспергировали в органическом растворителе. Тем самым получали разветвленную перколяционную сеть, прово-

дящие свойства которой характеризуются величиной тока включения. В качестве аддуктов авторы использовали либо перфтор-2(2-фторсульфонилэпокси) пропилен (PSEPVE), либо перфтор (5-метил-3,6-диоксанон-1-эме) (PMDE). Измерения показали, что в обоих случаях по мере увеличения степени функционализации образцов указанными радикалами наблюдается существенное снижение величины тока включения, что соответствует изменению механизма проводимости с металлического на полупроводниковый. Так, увеличение мольного содержания аддукта в образце PSEPVE с 0 до 0,04 приводит к снижению тока включения на 6-7 порядков величины - с 10^{-4} А до 10^{-12} - 10^{-11} А, в зависимости от межэлектродного расстояния. При этом оказалось, что мольного содержания аддукта на уровне 0.018 достаточно для практически полного превращения всех металлических УНТ в полупроводниковые. Тем самым установлено, что реакция циклоприсоединения является эффективным средством воздействия на электронные свойства однослойных УНТ.

А.Елецкий

I. M.Kanungo et al., Science 323, 234 (2009).

Частицы катализатора влияют на ток эмиссии нанотрубок

Полевые электронные эмиттеры на основе углеродных нанотрубок (УНТ) отличаются высоким током эмиссии при относительно небольшом приложенном напряжении (на уровне 1000 В). Разработка подобных систем требует решения целого ряда технических проблем, которые в первую очередь связаны с необходимостью выращивания однородных массивов вертикально ориентированных УНТ заданной геометрии. Нанотрубки, составляющие эмиссионный катод, обычно содержат металлические частицы катализатора, наличие которых могут изменить эмиссионные свойства УНТ. Такие частицы сопровождают рост нанотрубки и вряд ли могут быть легко удалены по окончании роста, когда необходимость в их присутствии отпадает. Тем самым возникает проблема исследования свойств таких частиц и установления их влияния на эмиссионные характеристики катода. Недавно группа сотрудников центра нанотехнологий г. Саппоро (Япония), детально исследовала поведение частицы катализатора, находящейся на вершине нанотрубки в процессе полевой электронной эмиссии. Отдельная многослойная нанотрубка, выращенная методом химического осаждения паров (CVD) с использованием в качестве катализатора частиц железа, помещалась в камеру просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ), работающего при давлении 10^{-8} Торр и напряжении 200 кэВ. Высота нанотрубки составляла 1.9 мкм, а ее внутренний и наружный диаметр равнялись 26.2 нм и 67.3 нм, соответственно. Расстояние между катодом, роль которого играла нанотрубка, и анодом составляло 0.25 мм, а ве-

личина приложенного к аноду напряжения изменялась до 1 кВ. Наблюдения, выполненные с помощью ПЭМ, показывают, что при токе эмиссии, превышающем 30 мкА, частица катализатора ведет себя подобно капле. Она движется по направлению к вершине нанотрубки, в то время как часть материала катализатора остается в слое аморфного углерода, покрывающем нанотрубку. В результате этого движения ток эмиссии резко падает, хотя приложенное напряжение остается неизменным. Затем жидкая частица стекает с вершины УНТ, разделяясь на несколько фрагментов, что сопровождается резким возрастанием тока эмиссии примерно с 20 до 40 мкА. При столь высоком токе эмиссии в межэлектродном промежутке наблюдается электрический разряд, вызывающий разрушение эмиттера. Аналогичное поведение частицы катализатора, находящейся на поверхности УНТ, наблюдалось также в отсутствие эмиссии, при нагреве нанотрубки с помощью вольфрамовой спирали диаметром 25 мкм до температуры 723 К и выше. Это указывает на единую причину описанного поведения частицы катализатора, связанную с ее нагревом. Хотя основные особенности поведения частицы обусловлены ее нагревом, некоторое влияние на это поведение оказывает приложенное электрическое поле. Это следует из наблюдений, выполненных при различной величине и направлении электрического поля и указывающих на эффект вертикального выстраивания нанотрубки при напряжении выше 900 В.

А.Елецкий

I. T.Fujieda et al., Appl. Phys. Express 1, 014002 (2008).

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

Квантовая механика бизнес-объектов

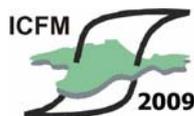
Мировая экономика находится сейчас в глубоком кризисе, и перспективы выхода из него весьма неопределенны. Тем более, что, по общему признанию, ни одна из существующих макроэкономических теорий не в состоянии полностью описать происходящие в настоящее время экономические процессы. А могут ли тут физики помочь экономистам? Может быть... И вот, два физика из МГУ в своем недавнем препринте [1] попытались применить квантовую механику для описания поведения некоторых структурных элементов экономики. В работе введены такие понятия, как эффективная масса (численность сотрудников и клиентов данной компании, другими словами, всех участников экономического процесса), спин компании (собственный момент импульса компании), связанный с понятием эффективной скорости (скорости работы сотрудников и совершения расчетных операций (компании с разными типами спинов подчиняются квантовым статистикам аналогичным статистикам Ферми-Дирака и Бозе-Эйнштейна)), нестабильность компании и время ее жизни; различные пути "распада" и "рождения" компаний; взаимопревращение компаний; основные и возбужденные энергетиче-

ские состояния компаний (мера энергии – любая денежная единица) и другие. Получено обобщенное соотношение неопределенностей, содержащее подлежащую экспериментально определению новую константу – обобщенную постоянную Планка. Показано, что бизнес-компании с малыми эффективными массами, как и квантовые микрообъекты, имеют следующие общие черты: несепарабельность, отсутствие понятия траектории и, следовательно, заметные трудности с каким-либо прогнозированием поведения (как квантовых частиц, так и компаний), малые эффективные массы, дискретный процесс взаимодействий и передачи энергии. По сути, авторы предлагают экономистам познакомиться с основами квантовой механики и попробовать вместе с физиками описать характер протекания экономических процессов или любых других событий, явлений, объектов, имеющих малую эффективную массу на малых участках пространства. Возможно, это поможет бизнес-структурам и нам вместе с ними успешно протуннелировать в светлое будущее.

1. V.I.Zverev, A.M.Tishin,
<http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0901/0901.4767.pdf>

КОНФЕРЕНЦИИ

5-ая Международная конференция «Функциональные материалы» ICFM' 2009
5-10 октября 2009, Партемит, Крым, Украина



Тематика конференции

1. Фундаментальная физика функциональных материалов
2. Магнитные материалы
3. Материалы спиновой электроники и явления переноса
4. Электро- и магнитооптические материалы
5. Пьезо- и магнитоэлектрические материалы
6. Магнитоупругие материалы и мартенситы
7. Метаматериалы и материалы для СВЧ-применений

8. Материалы для регистрации излучений
9. Нанотехнологии при синтезе функциональных материалов
10. Материалы для медицины и охраны окружающей среды. Биосенсоры
11. Современные методы и аппаратура для исследования материалов

Основные даты

Регистрационная форма **30** апреля 2009
Тезисы **31** мая 2009

Контакт

Тел.: (0652) 230223, 637595
E-mail: icfm@crimea.edu
Web: <http://www.icfm.crimea.edu>

Fourth International Symposium on Non-equilibrium Processes, Plasma, Combustion, and Atmospheric Phenomena, 5-9 October, 2009, Sochi (Dagomys), Russia.

1. Elementary physical and chemical processes;
2. Electrical discharges and other plasma sources;
3. Ignition and combustion: modeling and diagnostics;
4. Plasma assisted and laser-induced combustion;
5. Detonation;
6. Non-equilibrium processes in shock waves;
7. Physics and chemistry of high speed gas flow;
8. Propulsion;
9. Plasma, laser and combustion assisted technologies, fuel reforming, nanomaterials, and surface treatment;
10. Combustion - generated and atmospheric aerosols;
11. Pollutant emission and pollution control.

Key dates

Notification of participation and submission of extended abstract — before **April 1, 2009**.
Acceptance notification — before **May 10, 2009**.
Final Announcement with tentative program — before **June 10, 2009**.

Contacts

E-mail: star@ciam.ru
E-mail: smfrol@chph.ras.ru
Web: <http://www.nepcap2009.ciam.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: О.Алексеева, В.Вьюрков, А.Елецкий, Л.Опенов, А.Пятаков

Компьютерный ввод, макет: И.Фурлетова

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