

В этом выпуске:

## СПИНТРОНИКА

### Электрическая регистрация спинового эффекта Холла

Современная электроника основана на операциях с электрическими зарядами. В спинтронике функцию зарядов должны выполнять электронные спины. Одна из главных задач здесь заключается в разработке эффективных способов регистрации и измерения спиновых токов. В качестве источника спин-поляризованных электронов обычно используют ферромагнитные контакты. Но спиновый ток может возникнуть и из-за обычного (зарядового) тока: при движении электрона в электрическом поле спин-орбитальное взаимодействие приводит к тому, что электроны со спином “вверх” и со спином “вниз” отклоняются в разные стороны, и возникает спиновый разбаланс (рис. 1а).

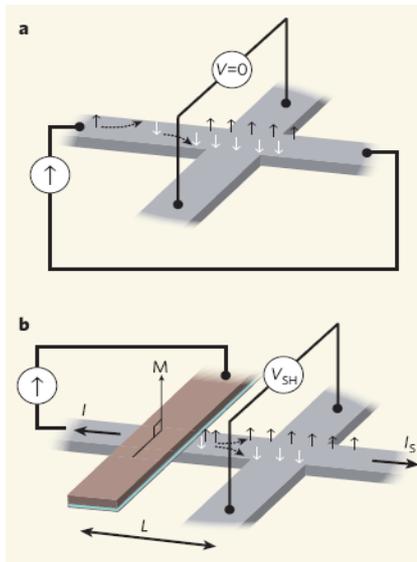


Рис.1 (из статьи [2])

Спиновый эффект Холла при неполяризованном (а) и поляризованном (б) по спину зарядовом токе.

Этот эффект называется спиновым эффектом Холла. Если зарядовый ток переносится неполяризованными электронами, то есть число электронов со спинами “вверх” и “вниз” одинаково ( $N_{\uparrow} = N_{\downarrow}$ ), то (в отличие от обычного эффекта Холла) поперечной разности потенциалов не возникает, и для экспериментального обнаружения разбаланса спинов приходится использовать сложные оптические методы. Если же зарядовый ток изначально поляризован по спину ( $N_{\uparrow} \neq N_{\downarrow}$ ), то в одну сторону будет отклоняться больше электронов, нежели в другую (рис. 1б). Поэтому спиновое холловское напряжение  $V_{SH}$  будет отлично от нуля. В работе [1] этот эффект использован для регистрации спинового эффекта Холла в немагнитном материале ( $Al$ ). Величина  $V_{SH}$  хоть и мала ( $\sim 10$ нВ в [1]), но вполне поддается измерению. А в полупроводниках она должна быть значительно больше. Использование спинового эффекта Холла значительно упрощает измерение и контроль спин-поляризованных токов. Авторы [1] полагают, что их результаты найдут широкое применение в спинтронных устройствах обработки информации и хранения данных.

пользовать сложные оптические методы. Если же зарядовый ток изначально поляризован по спину ( $N_{\uparrow} \neq N_{\downarrow}$ ), то в одну сторону будет отклоняться больше электронов, нежели в другую (рис. 1б). Поэтому спиновое холловское напряжение  $V_{SH}$  будет отлично от нуля. В работе [1] этот эффект использован для регистрации спинового эффекта Холла в немагнитном материале ( $Al$ ). Величина  $V_{SH}$  хоть и мала ( $\sim 10$ нВ в [1]), но вполне поддается измерению. А в полупроводниках она должна быть значительно больше. Использование спинового эффекта Холла значительно упрощает измерение и контроль спин-поляризованных токов. Авторы [1] полагают, что их результаты найдут широкое применение в спинтронных устройствах обработки информации и хранения данных.

1. S.O.Valenzuela, M.Tinkham, *Nature* 2006, **442**, 176
2. A.D.Kent, *Nature* 2006, **442**, 143

И далее ...

- 2 Спонтанная спиновая поляризация в квантовой нити!?

## НАНОСТРУКТУРЫ

- 2 Считаем электроны вперед и назад

## КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

- 3 Непосредственное наблюдение перехода ультрахолодного ферми-газа в сверхтекучее состояние

Сверхтекучесть твердых тел

- 4 Переход Березинского-Костерлица-Таулеса в двумерном атомном газе

- 5 Чувствительный Бозе-Эйнштейновский конденсат

## МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- 5 Спин-зависимые процессы в алюминиевом сплаве

## ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

- 7 Все о токсичности нанопуглерода

## СНОВА К ОСНОВАМ

- 9 Прощаясь с летом. О пользе мороженого для естественных наук

## Спонтанная спиновая поляризация в квантовой нити!?

Двойной знак в заглавии отражает настроение знаменитой группы из Cavendish Laboratory (Англия) - R. Crook, J. Prance, K. J. Thomas, S. J. Chorley, I. Farrer, D. A. Ritchie, M. Pepper, C. G. Smith, представившей недавно свои новые результаты по исследованию проводимости квантовой нити. С одной стороны, это радость от того, что наконец-то удалось наблюдать спонтанную спиновую поляризацию в квантовой нити, которую уже много лет обсуждают ученые, в том числе и автор этой заметки. С другой стороны, заявляется об этом осторожно. Говорится, что все полученные экспериментальные данные лучше всего согласуются с гипотезой о спонтанной поляризации.

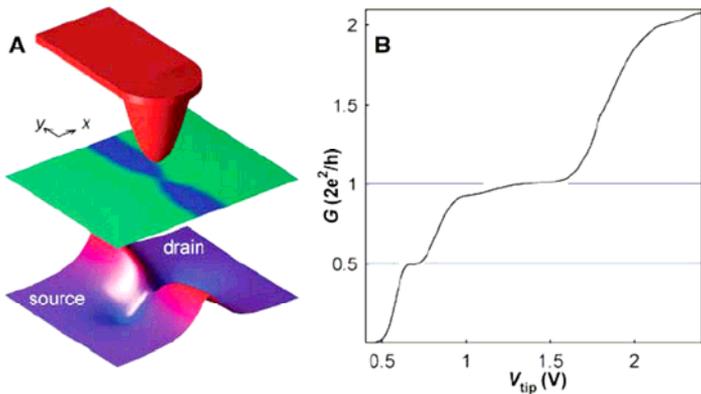


Рис. 1. Заряженные области на поверхности образца окрашены в синий цвет, внизу показан потенциальный рельеф в плоскости двумерного электронного газа, прогиб вызван положительным напряжением на острие сканирующего микроскопа (А). Отчетливо видна ступень проводимости 0.5 кванта, возникающая при изменении потенциала на острие (В).

В неполяризованном состоянии, когда есть вырождение по спину, проводимость квантовой нити составляет целое число половинных квантов  $G_0 = 2e^2/h$ . В вынужденном спин-поляризованном состоянии, которое достигается только в очень сильных магнитных полях ( $> 5$  Тл), проводимость квантовой нити равняется целому числу  $G_0/2$ . Именно поэтому, отчетливое наблюдение ступени проводимости на значении  $G_0/2$  без магнитного поля (рис. 1В), скорее всего, свидетельствует о спонтанной спиновой поляризации.

Возможно, наблюдать спиновую поляризацию удалось из-за особой конструкции прибора. Действительно, для формирования квантовой нити в нем используется много новшеств (рис. 1А). Исходным, как всегда является двумерный электронный газ, образующийся на гетерогранице  $AlGaAs/GaAs$ . А вот далее вместо металлического затвора используется т.н. «стираемая электростатическая литография» (EEL). На поверхность структуры наносится отрицательный заряд, который формирует область обеднения в двумерном электронном газе, именно

то, что прежде делал отрицательный потенциал на затворе. Положительное напряжение на острие сканирующего микроскопа создает седловую область, в которой и возникает квантовый канал длиной 20нм. Подробные исследования показали, что на его границах плотность электронного газа несколько выше, чем в остальных местах. Это обусловлено особой геометрией потенциального рельефа, образованной именно в данной структуре. По всей видимости, эти особенности существенны для наблюдения эффекта.

Помимо большого научного интереса, представленная работа открывает радужные перспективы полупроводниковой спинтроники, ведь спонтанная спиновая поляризация позволяет обойтись без сильного магнитного поля.

В.Вьюрков

1. Science 2006, 312, 1359

## НАНОСТРУКТУРЫ

### Считаем электроны вперед и назад

В NIT Basic Research Laboratories (Япония) изготовлен прибор на основе гетероструктуры  $AlGaAs/GaAs$ , который считает электроны, проходящие через две последовательные квантовые точки [1]. В качестве элемента, чувствительного к заряду, используется квантовый точечный контакт (рис. 1).

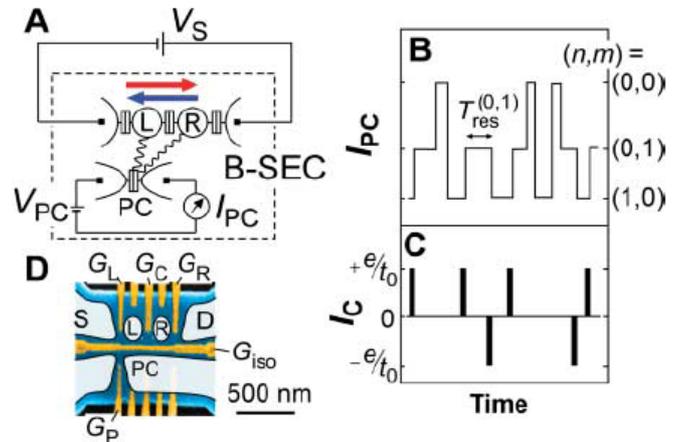


Рис. 1. (А) Схема устройства, состоящего из левой (L) и правой (R) квантовых точек и точечного контакта (PC). (В) Изменение тока через контакт, обусловленное перемещением электрона из одной точки в другую. (С) Импульсный ток через барьер между точками в момент перехода электрона. (D) Раскрашенная SEM картинка: желтый цвет - электроды, белый - проводящие области двумерного электронного газа, сформированные потенциалами затворов, голубой - области обеднения.

Удастся уверенно считать электроны, «скачущие» как в одном, так и в противоположном направлении. Как и во многих предыдущих экспериментах, выявлены два характерных времени, определяющих процесс туннелирования. На рисунках 1В и 1С видно, что электрон перескакивает за время  $t_0$ , которое гораздо меньше времени, обратного вероятности тун-

нелирования. Последнее время порядка расстояния между пиками. Удалось также произвести статистическую обработку, выявившую корреляции в туннелировании электронов, которые обусловлены кулоновской блокадой: два избыточных электрона не могут находиться в одной квантовой точке. Поведение тока близко к периодическим осцилляциям, что как раз свидетельствует о сильной корреляции.

Практическая польза от устройства состоит еще и в том, что оно измеряет токи аттоамперного диапазона ( $10^{-18}$  А), которые находятся далеко за границами возможностей всех прочих амперметров.

*В.Вьюрков*

1. *Science* 2006, 312, 1634

## КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

### *Непосредственное наблюдение перехода ультрахолодного ферми-газа в сверхтекучее состояние*

Во многих физических системах при понижении температуры происходят фазовые переходы: вода превращается в лед, магнитные моменты атомов спонтанно упорядочиваются, жидкий гелий становится сверхтекучим и т.д. Иногда такие переходы видны невооруженным глазом или сопровождаются эффектами, легко поддающимися регистрации, а иногда о них приходится судить лишь косвенно, по изменению тех или иных характеристик. Например, если при переходе бозе-газа в сверхтекучее состояние в нем формируется четко очерченное ядро с более высокой плотностью, то в газе из ферми-атомов такого расслоения не происходит. Хотя изменения профилей пространственного распределения сверхтекучей и нормальной частей атомного ферми-газа и были предсказаны теоретиками, они настолько незначительны, что экспериментально их ни разу не наблюдали. Для доказательства образования конденсата пар ферми-атомов приходится задействовать резко меняющиеся магнитные поля, влияние которых трудно моделировать теоретически, и поэтому результаты расчета (удельной доли атомов в конденсате и других величин) не согласуются с экспериментом.

В работе [1] американских ученых (Massachusetts Inst. Technology) предложен оригинальный способ непосредственного наблюдения перехода атомного ферми-газа с сильным взаимодействием в сверхтекучее состояние. Он основан на том, что в исходном атомном “облаке” число атомов ( $^6\text{Li}$  в [1]) со спином “вверх” и со спином “вниз” различно, и поэтому достаточно лишь, используя стандартные методики, определить температурные зависимости профилей плотности атомов с разными проекциями спина. При температуре выше критической и те, и другие однородно распределены по области конфайнмента магнитной ловушки (рис. 1а).

При понижении температуры до  $T_c \sim 100$  нК в центре облака формируется конденсат, состоящий из

пар атомов с противоположно направленными спинами, а оставшиеся не у дел неспаренные атомы образуют вокруг него оболочку с низкой плотностью (рис. 1б). Помимо того, что этот эффект легко регистрируется в эксперименте, нормальная оболочка выполняет еще и функцию термометра: при выключении потенциала ловушки она расширяется баллистическим образом, и измерение функции распределения ее атомов по скоростям позволяет определить температуру конденсата с высокой точностью. Таким образом, становится возможной количественная проверка предсказаний различных теоретических моделей. В частности, при  $N_\uparrow \neq N_\downarrow$  есть надежда обнаружить состояние Фулде-Феррелла-Ларкина-Овчинникова с неоднородным параметром порядка. Кроме того, усиление межатомного взаимодействия путем подстройки длины рассеяния (с помощью резонанса Фешбаха) дает уникальный шанс детально изучить свойства систем с очень сильной связью, в которых энергия спаривания намного больше других характерных энергий. Такие системы могут оказаться атомным аналогом супервысокотемпературных сверхпроводников.

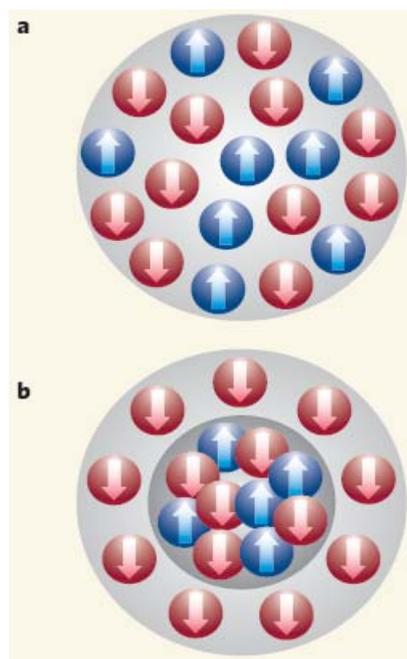


Рис.1 (из статьи [2])

(а) Однородная смесь атомов с  $N_\uparrow \neq N_\downarrow$  при  $T > T_c$ ;  
(б) Перераспределение атомов с разными проекциями спина при  $T < T_c$ .

1. *M.W.Zwierlein et al., Nature* 2006, 442, 54
2. *J.E.Thomas, Nature* 2006, 442, 32

### **Сверхтекучесть твердых тел**

Квантовая теория допускает существование сверхтекучих твердых тел – материалов, обладающих кристаллической структурой, но ведущих себя подобно сверхтекучим жидкостям и способных “перетекать” без трения. Экспериментально это состояние вещества, по-видимому, впервые наблюдали при изучении крутильных колебаний ячейки с твердым  $^4\text{He}$ : понижение температуры до 175 мК приводило к изменению момента инерции образца, как если бы около 1% его атомов перестали осцил-

лизовать вместе с ним [1]. Механизм возникновения твердой сверхтекучей компоненты при этом остался невыясненным. Непонятно также, находится ли эта компонента в термодинамическом равновесии. Требуется дальнейшего разбирательства и факт уменьшения концентрации сверхтекучей фазы после термоциклирования (нагрева и последующего охлаждения). В этой ситуации представляет интерес поиск других твердотельных систем, обладающих свойством сверхтекучести, а также разработка надежных способов экспериментальной регистрации их перехода в сверхтекучее состояние.

Одна из перспективных систем – “оптические кристаллы”: атомы в периодическом потенциале оптической решетки, созданной за счет интерференции двух пересекающихся лазерных пучков. Такие кристаллы практически не содержат дефектов. Будучи сформированы из атомов бозе-эйнштейновского конденсата в магнитной ловушке и охлажденными до низкой температуры, они могут перейти в сверхтекучую фазу, оставшись при этом “твердыми” (т.е., сохранив свою регулярную кристаллическую структуру). В теоретической работе [2] предложен способ доказательства факта этого перехода. Он основан на измерении интерференционного узора, возникающего при наложении квантовых “атомных волн” после выключения потенциала оптической решетки. Расчеты показали, что наличие в оптическом кристалле сверхтекучей компоненты должно приводить к появлению на интерферограмме дополнительного пика. По статистическому изменению атомной плотности в координатном пространстве можно будет, в свою очередь, судить о том, что упорядоченное расположение атомов в кристалле не нарушено, то есть сверхтекучий кристалл остался твердым. Все это осуществимо с использованием известных экспериментальных методик [3].

1. E.Kim, H.W.Chan, *Nature* 2004, **427**, 225
2. V.W.Scarola et al., *Phys. Rev. A* 2006, **73**, 051601
3. S.Folling et al., *Nature* 2005, **434**, 481

Кстати, сверхтекучесть в квантовом кристалле была впервые предсказана И.М.Лифшицем и А.Ф.Андреевым (дефектоны, вакансии и др.) - *Sov. Phys. JETP* 1969, **29**, 1107

### Переход Березинского-Костерлица-Таулеса в двумерном атомном газе

Квантовые атомные газы в магнитной или оптической ловушке представляют собой уникальные объекты для исследования свойств многочастичных систем. Поскольку параметры потенциалов конфинемента и межатомного взаимодействия хорошо известны, то теоретические модели могут быть количественно проверены на эксперименте. Яркий пример – бозе-эйнштейновская конденсация (БЭК) газа атомов рубидия [1]. При охлаждении такого газа до критической температуры  $T_{БЭК}$  происходит

фазовый переход в сверхтекучее состояние, которое описывается единой квантово-механической волновой функцией, то есть все атомы конденсата находятся в макроскопическом когерентном состоянии с определенной фазой: в системе есть *дальний порядок*. Известны и другие типы дальнего порядка (в кристаллах – структурный, в ферромагнетиках – магнитный и пр.). Общим для них является то, что все они имеют место в *трехмерных* (3D) образцах. Что касается низкоразмерных (1D и 2D) систем, то при любой сколь угодно низкой (но конечной) температуре тепловые флуктуации разрушают дальний порядок и поэтому, в частности, бозе-конденсат в таких системах может существовать только при  $T=0$ , то есть чисто теоретически. В двумерии, впрочем, флуктуации не полностью губят дальний порядок: сохраняются корреляции, которые хотя и ослабевают с расстоянием, но не экспоненциально, а по степенному закону. Этого оказывается достаточно для перехода в сверхтекучее состояние при конечной температуре. Эффект сверхтекучести двумерных систем без образования конденсата был предсказан более 30 лет назад Березинским, Костерлицем и Таулесом (БКТ). Согласно теории, переход в сверхтекучее состояние при этом обусловлен формированием пар вихрь-антивихрь.

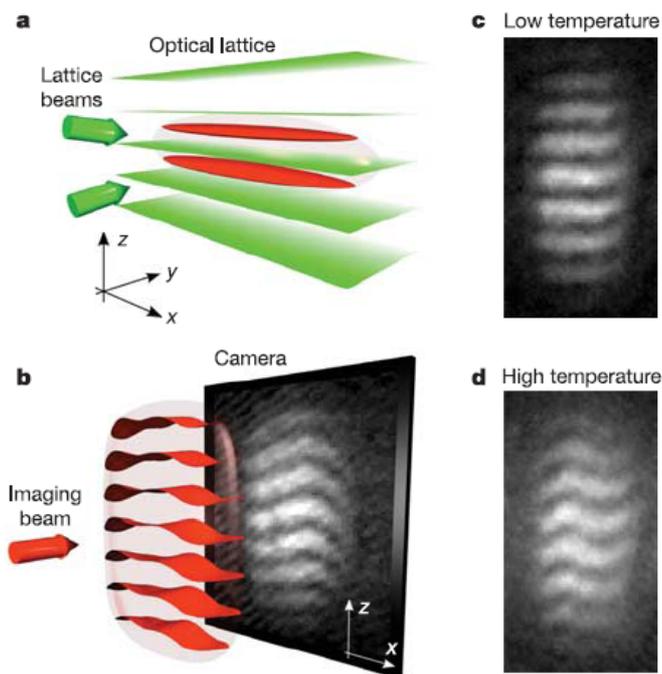


Рис. 1.

- а) Оптическая решетка с периодом в вертикальном направлении 3мкм, сформированная двумя интерферирующими лазерными пучками и использованная для расщепления вырожденного 3D бозе-газа на две 2D части. Исходная 3D конфигурация показана в виде розоватого эллипсоида.
- б) Интерференция 2D бозе-газов после выключения ограничивающих их потенциалов.
- с) и д) Примеры интерференционных узоров при низкой и высокой температуре, соответственно.

Имеется много свидетельств перехода БКТ в различных квазидвумерных системах – слоистых сверхпроводниках, пленках жидкого гелия, массивах джозефсоновских контактов и др. Но до сих пор все ограничивалось исследованием макроскопических проявлений этого перехода, сами же пары вихрь-антивихрь и их распад наблюдать пока не удавалось. Попытка увидеть всё это воочию была предпринята группой из Ecole Normale Supérieure (Париж) [2]. Исходным объектом послужило облако из  $\sim 10^5$  атомов  $^{87}\text{Rb}$  в магнитной ловушке с цилиндрической симметрией. В одномерной оптической решетке это облако расщеплялось на две половинки, каждая из которых сжималась в двумерный "блин" (см. рис.1а). Высоту потенциала решетки подбирали так, что вероятность туннелирования атомов между двумя 2D блинами за время эксперимента ( $\sim 1$ сек) была пренебрежимо мала, поэтому эти параллельные 2D атомные газы существовали фактически независимо друг от друга. Они имели размеры примерно  $120 \times 10 \text{ мкм}^2$ . После достижения 2D газами теплового равновесия, ограничивающие их потенциалы (и магнитный, и оптический) резко выключались, в результате чего оба 2D облака начинали расширяться (преимущественно в перпендикулярном направлении), перекрывались и интерферировали друг с другом (рис.1б). Для выявления этой интерференционной картины использовали резонансное поглощение света зондирующего лазера. Тщательный анализ таких картинок позволил авторам получить информацию о фазовых корреляциях в 2D бозе-газе при разных температурах. В частности, было установлено, что волнистость интерференционного узора говорит о сильных флуктуациях фазы. Они усиливаются с ростом температуры (рис.1с,д). Математическая обработка полученных результатов показала, что при  $T=T_{\text{БКТ}}$  плотность сверхтекучей компоненты возрастает скачком – в полном соответствии с теорией БКТ. Хотя использованная методика и не позволяет "разглядеть" пары вихрь-антивихрь, об их существовании ниже  $T_{\text{БКТ}}$  свидетельствует резкое увеличение количества отдельных вихрей при  $T > T_{\text{БКТ}}$ . На интерференционных картинках эти вихри выглядят как дислокации. Логично считать, что они появляются из-за разрыва пар вихрь-антивихрь при нагреве. Для прямого доказательства сверхтекучести 2D бозе-газа при  $T < T_{\text{БКТ}}$  нужно изучить упорядочение вихрей в решетку при его вращении или определить его вязкость по скорости затухания коллективных возбуждений. Это предполагается сделать в последующих экспериментах.

1. M.H.Anderson et al., *Science* 1995, **269**, 198
2. Z.Hadzibabic et al., *Nature* 2006, **441**, 1118

### **Чувствительный Бозе-Эйнштейновский конденсат**

В предыдущем выпуске ПерсТа (том 13, вып. 13) уже сообщалось о приготовлении атомного Бозе-Эйнштейновского конденсата канадскими учеными.

*ПерсТ, 2006, том 13, выпуск 14*

А вот сотрудники Univ. Heidelberg (Германия) обнаружили чрезвычайно высокую чувствительность такого конденсата к магнитному и электрическому полю [1]. Можно регистрировать изменения электрического потенциала  $10^{-14}\text{В}$  и магнитного поля  $10^{-9}\text{Т}$  с пространственным разрешением 3мкм. Существующие до сих пор методы позволяют добиться только чего-то одного: либо высокой чувствительности, либо хорошего пространственного разрешения.

Конденсат находится на расстоянии нескольких микрон от поверхности исследуемого образца. Создается он следующим образом. Вначале атомы  $^{87}\text{Rb}$  накапливаются из пара в зеркальной магнито-оптической ловушке. Затем они переправляются в магнитную ловушку, сформированную золотыми микронными проводниками на кремниевом чипе. Атомы выстраиваются в цепочку длиной 1мм. Исходное количество атомов составляет  $10^5$ . На конечном этапе производится их охлаждение за счет испарения, т.е. удаления наиболее «горячих» атомов.

*В.Вьюрков*

*1. Appl. Phys. Lett. 2006, 88, 264103*

## **МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

### **Спин-зависимые процессы в алюминиевом сплаве**

Влияние магнитного поля на рекристаллизацию ферромагнитных сплавов известно давно и широко используется в металлургии [1]. Однако, в недавних экспериментах Д.Молодова с соавторами [2] было показано, что магнитное поле влияет на эволюцию структуры сплавов. Меняется не только кинетика роста зерен, но и ранние стадии первичной рекристаллизации и восстановления. Часто эти эффекты приписывают магнитной анизотропии зерен, способных изменять ориентацию в сильном магнитном поле. Однако в [2] сообщается о влиянии магнитного поля на рекристаллизацию алюминиевого сплава, являющегося магнитоанизотропным.

Рентгеновские дифракционные исследования текстуры алюминиевого сплава АА3103 (1% Mn и 0.5% Fe) показали, что текстура после отжига почти такая же, как в исходном, прокатанном сплаве (рис.1 а), т.е. отжиг в отсутствие магнитного поля мало меняет текстуру. Отжиг в магнитном поле 17Тл при прочих равных условиях приводит к деградации дифракционных компонент деформационной текстуры (рис.1 б).

На рис.2. представлены зависимости интенсивности различных компонент дифракционного спектра от угла для времени отжига образца в магнитном поле и в его отсутствие. Видно, что наблюдается существенная деградация компонент текстуры в магнитном поле. На рис.3 изображена микроструктура исследуемого сплава, подвергнувшегося отжигу в магнитном поле и в его отсутствие. В отсутствие поля микроструктура деформированного и затем восстановленного сплава представляет собой несколько рекристаллизованных зерен в окружении мелкой струк-

туры. Термическая обработка сплава в магнитном поле приводит к почти полностью рекристаллизо-

ванной структуре с несколькими восстановленными зонами.

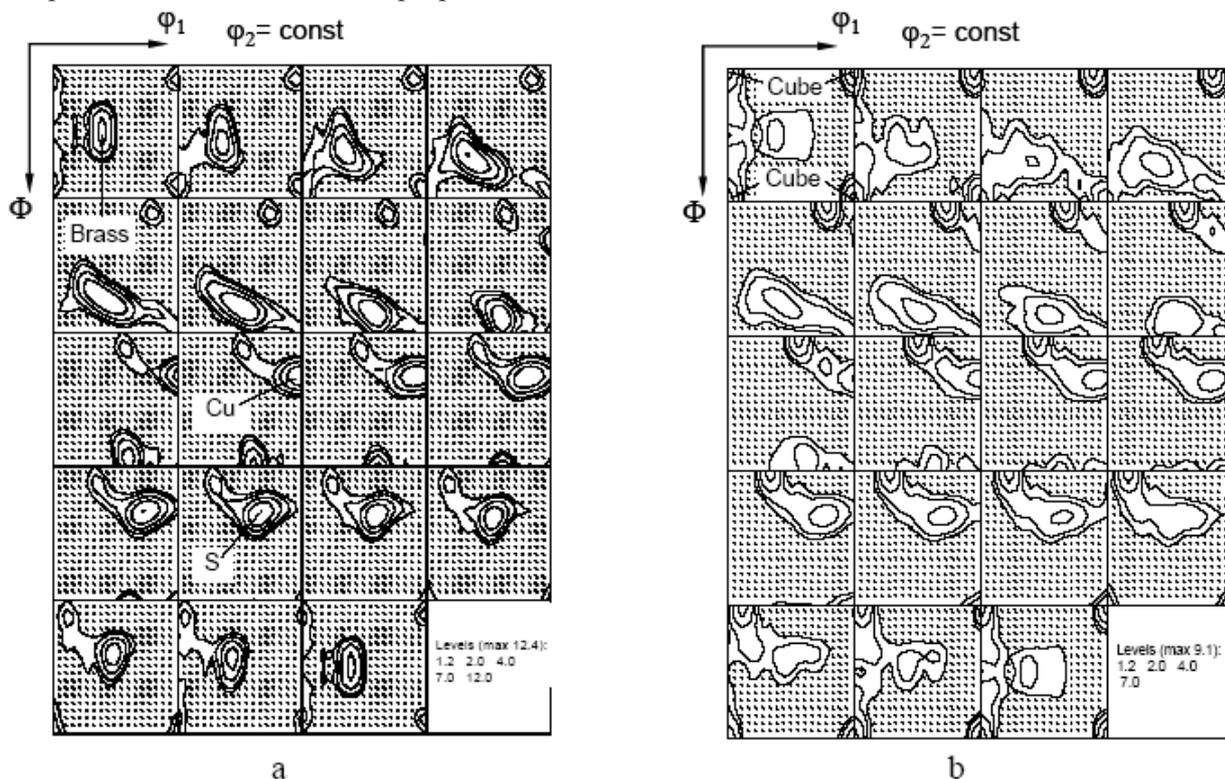


Рис. 1. Текстура прокатанного 71% алюминиевого сплава отожженного в течение 100 мин при 288°C (а) – в отсутствие магнитного поля, (б) – в магнитном поле 17 Тл.

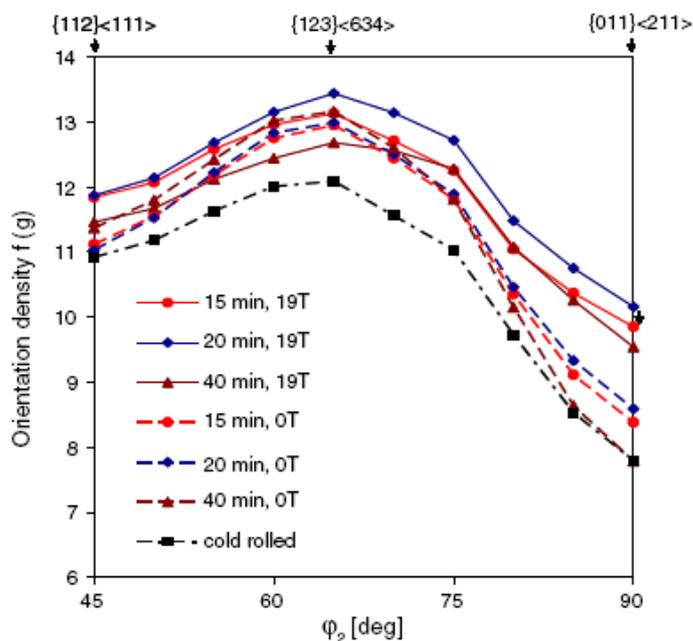


Рис. 2. Зависимость интенсивности различных компонент дифракционного спектра от угла для времени отжига образца в магнитном поле и в его отсутствие.

Полученные данные показывают, что магнитное поле изменяет кинетику накопления рекристаллизованной фазы, увеличивая скорость рекристаллизации на ее

начальных стадиях в несколько раз. Значительно сокращается инкубационный период рекристаллизации в магнитном поле. Авторы [2] предполагают, что подвижность межфазных границ значительно возрастает в магнитном поле. Одним из предлагаемых объяснений увеличения скорости рекристаллизации сплава в магнитном поле может быть влияние магнитного поля на подвижность дислокаций. Это явление в монокристаллах алюминия было обнаружено ранее группой В.И.Альшица в Институте кристаллографии РАН им. А.В.Шубникова (Москва). Многочисленные работы в этом направлении показали, что магнитное поле влияет на подвижность дислокаций не силовым способом, а изменяет кинетику протекания спин-зависимых реакций между дефектами структуры. Доказано [3], что под действием магнитного поля происходит распад мелких комплексов парамагнитной примеси, которой является марганец и железо, в изучаемых сплавах алюминия. Изменение структуры этих комплексов в магнитном поле способно привести к увеличению подвижности дислокаций и изменению кинетики рекристаллизации зерен.

Таким образом, исследование магнитоэластического эффекта в диамагнитных кристаллах продолжает развиваться в применении к материалам, имеющим широкие практические применения. При этом наблюдаются новые феноменологические проявления увеличения подвижности дислокаций в магнитном поле. Результаты, полученные авторами [2], свидетельст-

вуют о возможности управления свойствами сплавов с помощью спиновых степеней свободы дефектов структуры. Это направление исследований в области физики пластичности аналогично спинтронике. В

данном случае спин-чувствительным свойством материала является не электрический ток, а подвижность дислокаций - ток носителей пластичности.

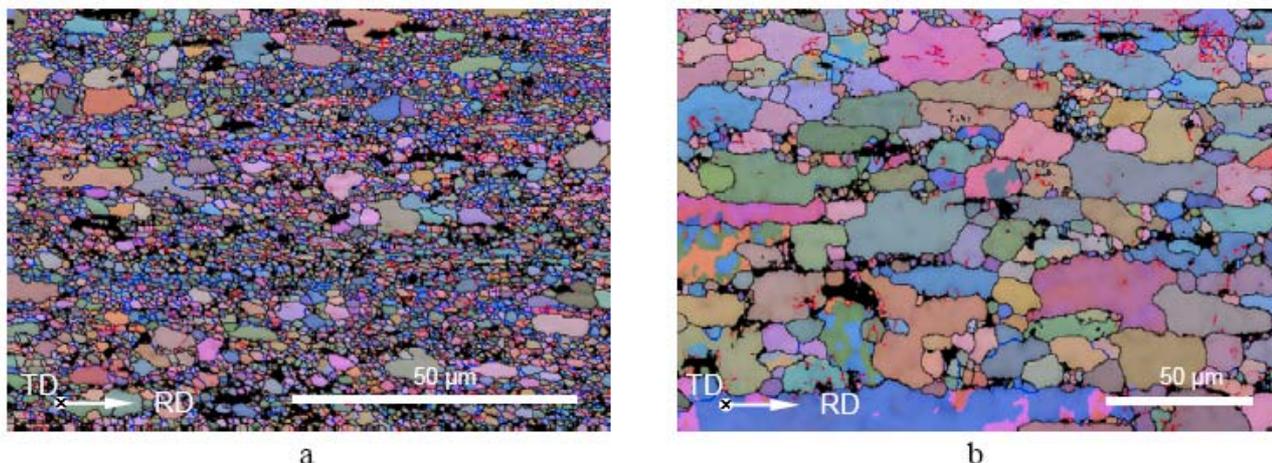


Рис.3. Микроструктура алюминиевого сплава после отжига при 288°C (a) – без магнитного поля, (b) – в магнитном поле.

*Р.Моргунов*

1. Watanabe T. In: Gottstein G, Molodov DA, editors. *Recrystallization and grain growth*. Berlin: Springer; 2001. p. 11.
2. *Scripta Materialia* 2006, **54**, 2161
3. *УФН*, 2004, **174**, N2, 131

## ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

### *Все о токсичности нанотрубок*

Специальный выпуск журнала *Carbon* (2006, **44**, № 6) посвящен токсикологии новых углеродных наноматериалов. Авторы вводной статьи [1] кратко обсуждают основные положения, касающиеся статуса, тенденций и необходимых новых исследований в этой области, представленные в десяти последующих основных публикациях.

Два последних десятилетия привели к бурному развитию синтеза и исследований новых углеродных наноматериалов. И все чаще стали возникать вопросы, а не вредны ли эти материалы для здоровья и окружающей среды. Первые результаты изучения этой темы оказались противоречивыми, и скорее не дали ответ на поставленные вопросы, а вызвали множество новых. Малый размер и большая удельная поверхность наноматериалов приводят к высокой химической активности, позволяют проникать в организм при вдыхании (и дальше в легкие), через кожу, или даже воздействовать на клеточном уровне. Более того, эти наноматериалы могут влиять на растения, животных, микроорганизмы.

На каждую из статей, представленных в этом специальном выпуске, были получены две рецензии - одна от специалистов «по углероду», а другая - от токсикологов, биологов или специалистов

в области биомедицины. В результате получился подбор уникальной информации. А теперь об основных темах.

Специальный выпуск начинается со всестороннего обзора литературных данных по биосовместимости углеродных нанотрубок (Smart S.K. *et al.*). Авторы сначала рассматривают традиционные углеродные материалы, применяемые в биомедицине (например, в качестве имплантатов), а затем переходят к углеродным нанотрубкам (УНТ). Представлен обзор данных по воздействию УНТ при попадании на кожу, при вдыхании (действие на легкие), по цитотоксичности; рассматривается применение нанотрубок как наноструктурной поверхности для роста костей или нейронных каркасов; для доставки лекарств и вакцин. Совместное обсуждение токсичности и биосовместимости выявляет тесную связь между двумя этими темами. Главные направления новых исследований, по мнению авторов, следующие: воздействие на легкие; раздражение кожи; отклик макрофагов; влияние свойств УНТ на цитотоксичность; сорбция, распределение и выделение *in vivo*; эффективность функционализации УНТ для биосовместимости. В заключение авторы указывают на возможный вклад в токсичность примесей катализаторов. Этим может объясняться вредное воздействие, обнаруженное для неочищенных УНТ.

Работа Muller J. *et al.* также является обзорной, но акцент делается на токсичности вдыхаемых нанотрубок. Авторы считают, что, хотя литературные данные являются неполными, тем не менее, есть основания опасаться вредного воздействия углеродных нанотрубок, если они проникают в легкие. Это подтверждается некоторыми экспериментами на животных. Этой же проблемы касаются две работы по изучению воздействия на легкие, выполненные на моделях жи-

вотных. Grubek-Jaworska H. *et al.* наблюдали патологию легких, вызванную тремя типами волокнистого нанотрубопровода, введенного интратрахеально и затем попадающего в легкие морских свинок; а Warheit D.B. изучал крыс. Результаты последней работы показывают, что в отличие от действия мелких частиц кварца, асбеста, вызывающих прогрессирующие повреждения, УНТ вызывают только образование гранулем - реакцию ткани на чужеродные тела. Для получения данных о вредном воздействии нанотрубок необходимы дальнейшие эксперименты на крысах, исследующие именно вдыхание аэрозольных УНТ (как может быть в реальных условиях), а не интратрахеальное введение.

Две следующие работы посвящены воздействию на кожу (Monteiro-Riviere N.A. и Inman A.O.) и подкожному введению (эксперименты на мышах), (Koyama S. *et al.*). Токсичность в первом случае определяется вероятностью проникновения и транспорта во внешние слои кожи с последующей миграцией вглубь. Кроме литературных данных, авторы представляют новые сведения о роли сажи, которая обычно используется как контрольный материал. Во второй работе углеродные наноматериалы были имплантированы в течение 3 месяцев. Авторы обнаружили образование гранулем и изменения в клетках периферической крови, но смертности животных не было, и фиброз был меньше, чем для асбестовых волокон. Это внушает надежду на возможное безопасное применение углеродных наноматериалов в промышленном масштабе.

Следующая статья (Flahaut E. *et al.*) посвящена оценке возможной токсичности УНТ, используемых для доставки лекарств или диагностики. Было проверено воздействие растворов образцов на культуры эндотелиальных клеток человека. Жизнеспособность клеток и обменные процессы в отличие от случаев воздействия контрольного агента - фенола - практически не ухудшились.

Fiorito S. *et al.* сравнили воспалительные процессы в макрофагах человека и мышей при воздействии ОСНТ и фуллеренов высокой степени очистки с эффектами от контрольных образцов (графитовые частицы в комбинации с липополисахаридами). Сделан вывод о положительном влиянии очистки углеродных наноматериалов - такие образцы имеют очень низкую токсичность.

Статья Chlopek J. *et al.* отличается от других тем, что фокусирует внимание на положительных медицинских эффектах углеродных нанотрубок. Речь идет о целенаправленном введении нанотрубок в организм (например, для регенерации ткани). Авторы представляют обзор литературных данных по биосовместимости, и затем исследуют взаимодействие фибробластов, остеобластов и остеокальцина с очищенными МСНТ с остаточ-

ным содержанием Mg и Ca (0.02 и 2 масс. %, соответственно). Делается вывод об ограниченной реакционной способности углеродных наноматериалов.

Влияние на окружающую среду рассмотрено в последней из представленной серии статье (Oberdörster E. *et al.*). Как растворимые, так и нерастворимые углеродные наночастицы могут попасть в живущие в воде организмы (например, рыбы могут принять за пищу плавающие на поверхности нерастворимые частицы). Авторы изучили влияние фуллеренов на два вида рыб и на некоторые ракообразные организмы, обитающие в морской и пресной воде. Свои исследования они начали с фуллеренов из-за их простоты в сравнении с нанотрубками, которые обычно представляют смесь разных типов и содержат примеси металлов. Максимальная концентрация фуллеренов  $pC_{60}$  была  $35 \times 10^{-6}$  для пресной воды и  $22,5 \times 10^{-6}$  для морской (при большей концентрации фуллерены выпадали в осадок, таким образом, летальная доза не была достигнута). Обнаружены сублетальные эффекты для зоопланктона *Daphnia magna*, обитающего в пресной воде, и некоторые изменения для одного из видов рыб. У пресноводных рыбок *Oryzias latipes* изменений не наблюдали. Правда, авторы отмечают, что надо учитывать детали процедуры кормления рыб.

Все авторы, представляющие как академические институты, так и промышленность единодушны в том, что для оценки потенциально вредных эффектов от углеродных наноматериалов нужны дальнейшие исследования. Нельзя сказать, что доказано полное отсутствие вреда или, наоборот, что вред во всех случаях есть. Необходимо после химической обработки тщательно характеризовать материалы — многие из них представляют смесь различных форм углерода, включают соединения металлов (оксиды, карбиды). Наблюдаемая токсичность во многих случаях может быть обусловлена примесями, а не самим материалом.

Следует понимать, что большинство экспериментов проводится в условиях, когда контакт наноматериалов с живым организмом достигается искусственным путем (имплантацией, капельным введением и т. д.), уровни доз необязательно отражают реальную картину. Кроме того, не учитывается возможность естественной защиты — например, нанотрубки склонны к формированию агрегатов, размеры которых существенно больше, образование аэрозолей может быть затруднено. Нужны новые экспериментальные приборы «на стыке» биологии и материаловедения, следует выявить наиболее важные показатели токсичности; необходимо определять дозу, полученную клеткой-мишенью. Проблем еще много, и очень важна роль ученых, занимающихся новыми углеродными наноматериалами. Материалы, предоставляемые для токсикологических исследований, должны быть охарактеризованы хотя бы в такой степени: химический состав для всех элементов с содержанием  $> 0.1\%$ ;

удельная поверхность, детальное описание морфологии, полученное с помощью электронной микроскопии; желательно иметь химический состав поверхности, текстуру, степень кристалличности. И, конечно, очень важно, объединив усилия исследователей из разных областей, создавать материалы, имеющие минимальную токсичность. Должна быть обеспечена обратная связь: за синтезом и очисткой наноматериалов должны следовать стадии токсикологической проверки, полученная информация должна использоваться для оптимизации стадий синтеза и очистки. Только такой подход позволит защитить здоровье людей и окружающую среду.

О.Алексеева

1. *Carbon* 2006, 44, 6.

## СНОВА К ОСНОВАМ

*Прощаясь с летом.*

*О пользе мороженого для естественных наук*

По случаю череды аномально жарких лет сомнений в востребованности мороженого не возникает, хотя отношение к мороженому у большинства людей, в том числе естествоиспытателей, легкомысленно-неуважительное. А зря. По случаю жаркого отпускного времени, отвлекемся на одну историю.

Давным-давно, в 1963 году, в далекой Африке, танзанийский школьник по имени *Erasto Mpemba* делал лабораторную работу по приготовлению мороженого (*что, кстати, рождает сомнение – а правильно ли мы представляем себе, какова жизнь в дикой Африке?*). Отвлекаясь, этот юный танзаниец поставил свою смесь замораживаться последним в группе, когда стаканчики остальных уже некоторое время стояли на полке в морозильнике. (*Неужели и там есть кулинарные техникумы?*) Когда юные кулинары открыли дверцу морозильника, чтобы сдать работу и получить оценку, оказалось, что большинство стаканчиков с будущим мороженым еще не застыло. Не застыло подавляющее большинство, то есть просто все, кроме одного – того стаканчика, который был поставлен последним.

Не сохранилось сведений, какую оценку *Mpemba* получил, и как реагировали на этот странный факт остальные. Но юный африканский Ломоносов отложил факт в памяти и дома стал повторять опыт (*вдумчиво смотри первый комментарий в скобках*). Когда стало ясно, что результат воспроизводится, *Mpemba* обратился к своему преподавателю физики. Тот отреагировал так, как отреагировало бы, наверное, большинство преподавателей и у нас – он свел ответ к насмешкам. Совершенно случайно, всего через полгода в школу заезжал с лекциями профессор физики из сосед-

него университета, и *Mpemba* не постеснялся загадать эту загадку заезжему профессору.

С этого момента действие стало развиваться иначе. Профессор посмотрел, проверил, заинтересовался, поднял историю вопроса и заодно «раскрутил» (как теперь говорят) самого *Erasto Mpemba*, который дальше в этой истории не участвует. Зато представители естественных наук теперь могут начать читать внимательней.

Оказалось, что вопрос: – что быстрее замерзает – холодная вода или горячая, – уходит корнями в античное естествознание, и по этому вопросу имеются труды Аристотеля, обоих Бэконов и Декарта (!), так что наблюдательный африканский школьник оказался в достойной компании. Более того, в современном фольклоре северных стран есть четкое поверие, что горячей водой машину на холоде мыть не стоит – быстрее замерзнет. Если факт считать установленным, то понятно, к каким серьезным выводам он может вести: о структурности воды, о чередовании этих структур при охлаждении, о кинетике смен структур и гистерезисе(!) при этих превращениях. Не удивительно, что сделать следующее открытие в этой области *Erasto Mpemba* оказалось уже не под силу. Но и профессиональные исследователи, пытавшиеся победно разложить все по полочкам, не очень в этом преуспели.

Выяснилось, что есть еще одна область, которую затрагивают эксперименты с мороженым, и в которую это все свернуло. Мороженое – несерьезный объект, и при попытке корректно формализовать описанные выше эксперименты, выяснилось, что ясный в общем-то факт каждый специалист понимал по своему; в результате чего борцы за корректность рассыпали проблему в трудно собираемую мозаику.

Тем не менее, несмотря на летнее отпускное время – а может быть и благодаря ему – есть о чем задуматься. Сколько существенного пролетает мимо нас и забывается просто потому, что казалось странным или попало не вовремя! Не будем же высокомерны по отношению к мороженому и другим несерьезным вещам. Как говорил Гамлет, принц датский: «...на свете много есть такого, друг Гораций, что и не снилось нашим мудрецам...».

М.Компан

1. *Aristotele, Meteorologica, trans. H.D.P.Lee, Harvard University Press, 1962, Book I, Chapter XII, p.85-87*
2. *F.Bacon, Novum Organum, in Physical and Metallurgical Works of Lord Francis Bacon, ed. J.Devey (G.Bell and Sons, Ltd., London 1911) Book II, Chapter L, p.559*
3. *R.Bacon The Opus Majus of Roger Bacon trans. R.Belle Bruke, vol.II (Russell and Russell Inc. NY, 1962), part 6, p.584,*
4. *R.Decartes Discurs of Methods, Optics, Geometry and Meteorology, trans. P.J.Olscamp (Bob-*

*Merrill Company, Indianapolis, 1965) Meteorology, Ch.1, p.268.*

5. *А также* <http://physicsweb.org/articles/world/19/4/4/1>

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

Редактор: С.Корецкая тел: (095) 930 3389, e-mail: [stk@issp.ras.ru](mailto:stk@issp.ras.ru)

Научный консультант: К.Кугель, e-mail: [kugel@orc.ru](mailto:kugel@orc.ru)

В подготовке выпуска принимали участие: О.Алексеева, В.Вьюрков, М.Компан, Р.Моргунов,  
Ю.Метлин, Л.Опенов

Компьютерный ввод, макет: И.Фурлетова

Адрес редакции: 119296 Москва, Ленинский проспект, 64<sup>а</sup>