

В этом выпуске:

МАГНИТЫ

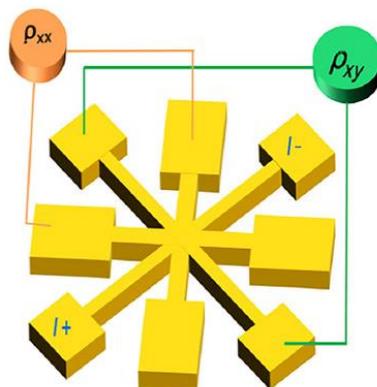
Британский крест китайских ученых: элемент памяти на новом типе доменной структуры в FeRh

Когда говорят о магнитной памяти, чаще всего подразумеваются, что физической реализацией битов служат домены в ферромагнетике или похожие на них области с одинаковой намагниченностью в записывающей среде. Значительно реже говорят о памяти на антиферромагнитных доменах, в основном в контексте спинтроники антиферромагнетиков. А вот исследователи из Tsinghua Univ. и Fudan Univ. (Китай) предлагают использовать для записи информации состояние, в котором сосуществуют антиферромагнитные и ферромагнитные домены [1].

Такая необычная ситуация реализуется в сплаве железа и родия: при одинаковом содержании двух элементов переход от антиферромагнитной фазы к ферромагнитной происходит при нагревании сплава в области комнатных температур. Поскольку этот фазовый переход относится к первому роду, то в определенном диапазоне температур ферромагнитная и антиферромагнитная фазы сосуществуют, образуя подобие доменной структуры. При этом два типа доменов отличаются по проводящим свойствам, что позволяет судить о состоянии доменной структуры, проводя измерения магнитотранспортных свойств FeRh.

Рис. 1. Схема измерений магнитотранспортных свойств пленки $\text{Fe}_{49,5}\text{Rh}_{49,5}\text{Pt}$ толщиной 30 нм на подложке из MgO (001):

ρ_{xx} и ρ_{xy} – обычное и холловское сопротивления, соответственно.



Для этого авторы [1] использовали структуру, представляющую собой соединенные Георгиевский и Андреевский кресты (в эти дни, когда Британия готовится к своему “прыжку в неизвестность”, трудно отделаться еще и от ассоциации с флагом Соединенного Королевства). Такая структура позволяет одновременно измерять холловское и обычное сопротивления (рис. 1), а также исследовать анизотропию сплава.

И далее ...

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

- 2 Волокна из углеродных нанотрубок помогут сердцу
- 4 Фуллерены для стабилизации азотного топлива

КОНФЕРЕНЦИИ

- 5 International Quantum Complex Matter Conference 2020 (QCM2020), June 8-12, 2020, Frascati (Rome), Italy

Так, было замечено, что поперечное напряжение за счет эффекта Холла возникает только тогда, когда ток пропускают вдоль сторон прямого креста (т.е. в направлении $[110]$ и перпендикулярном ему), что связано с анизотропией в расположении доменных границ между ферромагнитной и антиферромагнитной фазами. Как видно из рис. 2 расположение ферромагнитной области (оранжевая область на рис. 2с, d) вдоль реек креста за счет ее повышенной проводимости приводит к преимущественному рассеянию электронов в вертикальном направлении, причем знак холловского напряжения зависит от того вдоль какой из диагоналей вытянуты ферромагнитные домены. Таким образом, по сигналу холловского напряжения, снимаемого с вертикальных электродов на рис. 2а, б можно судить о величине и расположении ферромагнитных доменов в антиферромагнитном окружении, т.е. считывать информацию о микромагнитной структуре элемента.

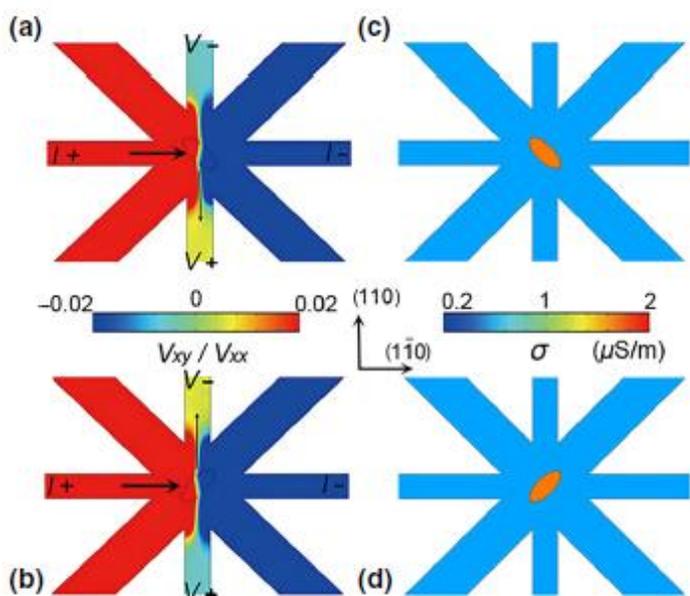


Рис. 2. Магнитотранспортные свойства пленки FeRh. Условными цветами показан сигнал холловского поперечного напряжения нормированного на продольное V_{xy}/V_{xx} и удельная проводимость σ [1]

Но для создания полноценной памяти необходимо еще и уметь записывать информацию. В большинстве работ, посвященных сплаву железо-родий, баланс между ферромагнитной и антиферромагнитной фазами смещают магнитным полем или механическим напряжением. В данной же работе воздействие осуществляется током высокой плотности – порядка MA/cm^2 . Правда, без магнитного поля здесь тоже не обходится, причем довольно сильного – около 6 Тл. Увеличивая плотность тока от величины

$10^5 \text{ A}/\text{cm}^2$, соответствующей токам считывания, до $10^7 \text{ A}/\text{cm}^2$, можно наращивать относительную долю ферромагнитной фазы, от которой зависит величина холловского сопротивления элемента. Авторы [1] предлагают сразу несколько механизмов возникновения ферромагнитной фазы под действием тока, среди которых как простой нагрев вследствие джоулева тепла, так и намагничивание за счет эффекта передачи спинового момента (spin transfer torque).

В заключение, можно предположить, что элементы устройств памяти на основе сплава железо-родий вовсе не обязательно будут иметь вид британского флага, но сама идея об управлении доменными границами между ферромагнитной и антиферромагнитной фазами с помощью тока, может иметь развитие в спинтронике.

А. Пятаков

1. X.Z.Chen et al., *Phys. Rev. Appl.* **11**, 024021 (2019).

ФУЛЛЕРЕНА И НАНОТРУБКИ

Волокна из углеродных нанотрубок помогут сердцу

Аритмия сердца, особенно желудочковая тахикардия, которая может привести к фибрилляции желудочков, является одной из главных причин внезапной смерти в развитых странах. Из-за некроза миокарда, появления рубцовой ткани после инфаркта нарушается передача электрических импульсов, обеспечивающая нормальный сердечный ритм. Для лечения аритмий применяют как лекарственные, так и хирургические методы. К сожалению, антиаритмические препараты часто имеют противопоказания или приводят к вредным побочным эффектам. В настоящее время для лечения желудочковой тахикардии, как правило, приходится использовать радиочастотную абляцию, разрушающую уплотненные волокна сердечных мышц, или даже имплантацию дефибриллятора. Конечно, ученые во всем мире разрабатывают новые подходы к восстановлению проводимости. Например, можно проложить проводящий “мостик” через поврежденную часть миокарда. Однако найти подходящий материал до сих пор не удавалось, ведь он должен не только обладать высокой электропроводностью, гибкостью, долговечностью, усталостной прочностью, но и быть биосовместимым и стабильным в физиологической среде.

Металлическая проволока не подходит по многим параметрам; проводящие полимеры не имеют нужной электропроводности и недостаточно стабильны; хирургические шовные материалы не могут передавать электрические импульсы. Прорыв в этом направлении недавно совершили американские ученые [1]. В экспериментах *in vivo* исследователи (среди которых и кардиологи, и электрофизиологи, и физики, и биоинженеры) продемонстрировали, что вос-

становить проводимость миокарда можно с помощью волокон на основе углеродных нанотрубок (CNTf). Волокна получали прядением из раствора одностенных нанотрубок в хлорсульфоновой кислоте по методике, ранее разработанной участниками коллектива (рис. 1, [2]). Этот гибкий, очень прочный, биосовместимый материал обладает высокой электропроводностью.

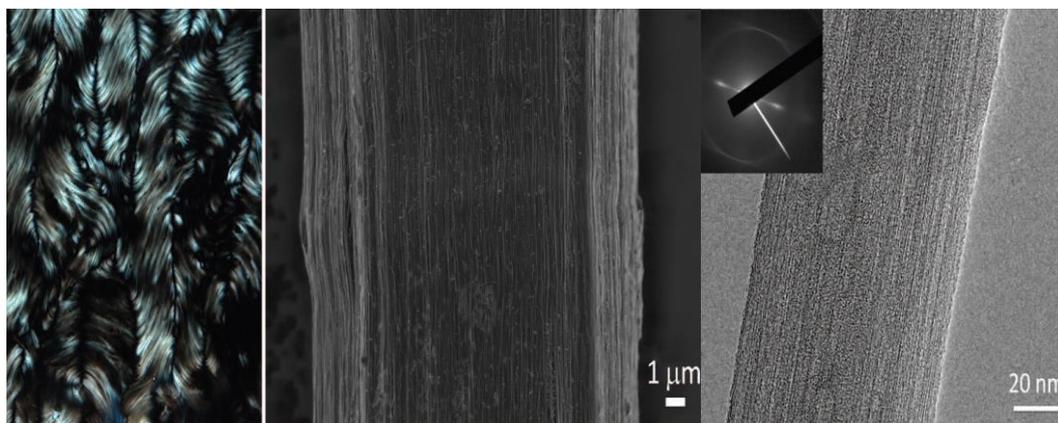


Рис. 1. Слева - фотография жидкокристаллического раствора для прядения (3 вес.% нанотрубок в хлорсульфоновой кислоте). В центре – SEM изображение CNTf, состоящей из фибрилл толщиной ~ 100 нм. Справа – ТЕМ изображение отдельной фибриллы волокна и электронная дифракция (врезка).

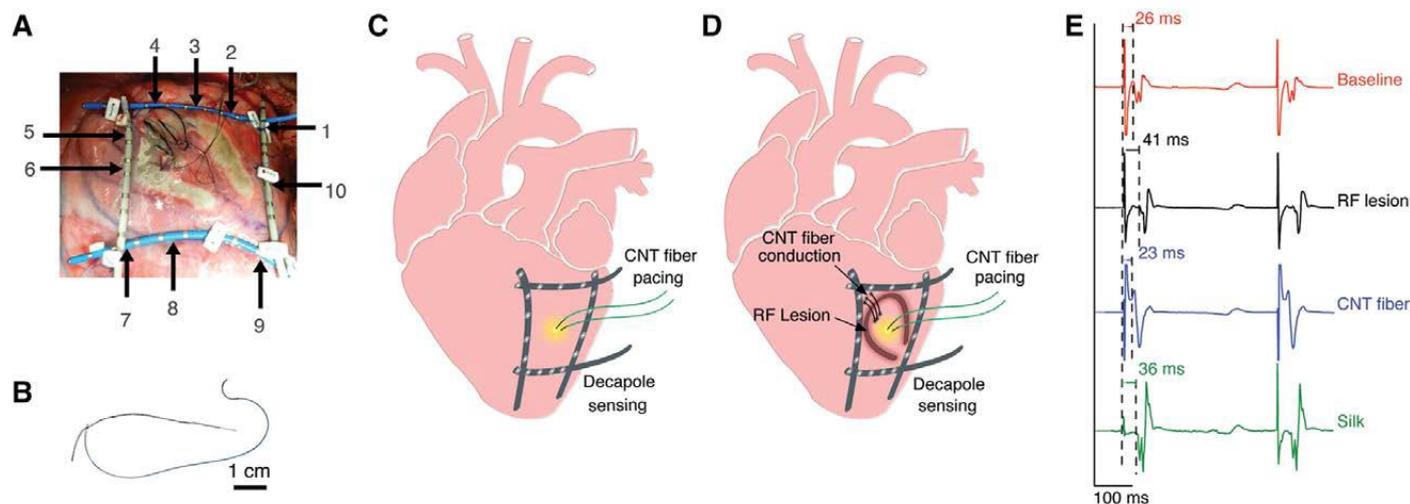


Рис. 2. Волокна из углеродных нанотрубок (CNTfs) увеличивают проводимость пораженного миокарда. **А.** Фотография участка сердца овцы с имплантированными CNTfs. Волокна для восстановления проводимости вшиты поперек шрама. Волокна для подачи импульсов вшиты в центр области, ограниченной четырьмя декаполярными диагностическими катетерами. **В.** Хирургическая игла с нитью, к которой привязано волокно. **С, D.** Схема сердца с имплантированными CNTfs до и после формирования рубца, соответственно (CNT fiber pacing – волокна для подачи импульсов, CNT fiber conduction – волокна для восстановления проводимости). **Е.** Электрограммы и время активации, записанные в позиции 4. Сверху вниз – базовое время (красный цвет), после формирования рубца (черный цвет), после рубца с CNTfs (синий цвет) и с шелковой нитью (зеленый цвет).

Исследования проводили на мышах и крысах (использовали волокна диаметром 26 мкм), а также на овцах (волокна диаметром 43 мкм), поскольку для демонстрации действия CNTf

in vivo требуется достаточно большой размер сердца. Во всех экспериментах предварительно ухудшали или полностью блокировали проводимость участка ткани сердца, а потом восста-

навливали ее с помощью вшивания CNTf волокон. Волокна эффективно работали как при наличии имплантированного кардиостимулятора, так и без него даже при длительных испытаниях.

Рассмотрим подробнее один из примеров – восстановление проводимости миокарда овцы с помощью CNTf. Для оценки действия волокон ученые выбрали область эпикардальной ткани в левом желудочке – место, характерное для инфаркта миокарда, рубца, желудочковой аритмии. Участок размером 10×10 см окружили четырьмя декаполярными диагностическими катетерами, в центр вшили волокна CNT для подачи импульсов от кардиостимулятора (длительность цикла 400 мкс, 150 ударов сердца в минуту) (рис. 2А, С). Дополнительно вшили два диагностических CNT волокна в позиции 4, указанной на рис. 2А. Их использовали для оценки времени задержки импульса (рис. 2Е). Базовое время задержки составило 26 мкс. Далее с помощью радиочастотной абляции сформировали рубец в форме подковы (рис. 2А, D). Этот рубец нарушил нормальную передачу импульсов между участками здоровой ткани. Время задержки выросло до 41 мкс. Затем волокно привязали к шовной нити, соединенной с иглой (рис. 2В), и вшивали поперек рубца (рис. 2А, D). Проводимость практически восстанавливалась (задержка составила 23 мкс). Замена CNTf на шелковые шовные нити привела к значительному ухудшению проводимости (задержка 36 мкс).

Исследования биосовместимости, которые проводили как *ex vivo*, так и *in vivo* на крысах в течение 28 дней, не выявили токсичности, фиброза или повышенного иммунного отклика. Заметим, что вшиваемые волокна (кроме контактных концов, присоединенных к приборам) были покрыты используемым в медицине полимером.

Конечно, до испытаний на людях еще далеко. Необходимо найти минимально инвазивный катетер для вшивания, подобрать оптимальные размеры волокон, убедиться в стабильности их свойств. Решить все эти вопросы можно только совместными усилиями физиков, медиков, инженеров, физиологов.

О. Алексеева

1. M.D.McCauley et al., *Circ. Arrhythm. Electrophysiol.* **12**, 12:e007256. (2019).
2. N.Behabtu et al., *Science* **339**, 182 (2013).

Фуллерены для стабилизации азотного топлива

О многообещающих перспективах новых видов топлива на основе немолекулярного азота достаточно часто можно прочитать на страницах научной периодики. Дело в том, что при распаде метастабильных азотных систем может выделяться существенное количество энергии за счет образования молекулярного азота N_2 . Например, для чисто азотных структур энерговыделение превышает 2 эВ/атом (энергия системы резко понижается вследствие разрыва одинарных ковалентных связей и формирования тройных связей N–N). Поэтому азотосодержащие системы часто рассматриваются в качестве функциональных блоков энергоемких материалов и топлив следующего поколения с высокой плотностью запасаемой энергии. Однако одной из основных задач, требующих решения при создании азотных высокоэнергетических соединений, является стабилизация последних. Стабилизация может проводиться различными способами. Наиболее “реальными” методами исследователи считают краевое и поверхностное допирование (пассивирование), создание комбинированных углерод-азотных каркасов и формирование эндодральных комплексов, например, введение чисто азотных систем в углеродный замкнутый каркас.

Работа российских исследователей из МИФИ [1] посвящена как раз использованию фуллеренов в качестве таких каркасов для повышения устойчивости чисто азотных кластеров. В роли азотного кластера в работе выступает кубан N_8 (см. рис.). Для оценки его кинетической устойчивости внутри фуллерена C_{60} авторы использовали метод молекулярной динамики с неортогональным потенциалом сильной связи. Они детально проанализировали процесс распада, а полученные данные позволили определить температурную зависимость времени жизни N_8 и рассчитать энергию активации и частотный фактор в формуле Аррениуса для оценки времени жизни. Авторам удалось установить, что фуллереновая клетка действительно повышает кинетическую устойчивость N_8 по сравнению со свободным кластером, но, к сожалению, этого все равно оказывается недостаточно для комфортного экспериментального наблюдения азотного кубика без использования экстремальных температурных режимов. Так, при комнатной температуре время жизни N_8 до момента распада не превышает 2 пс, а при темпе-

ратуре кипения жидкого азота (77 К) оценивается в 10 мс. В качестве продуктов его диссоциации авторы наблюдали привычные молеку-

лы N_2 , которые ковалентно связывались с внутренней поверхностью фуллереновой клетки (см. рис.)

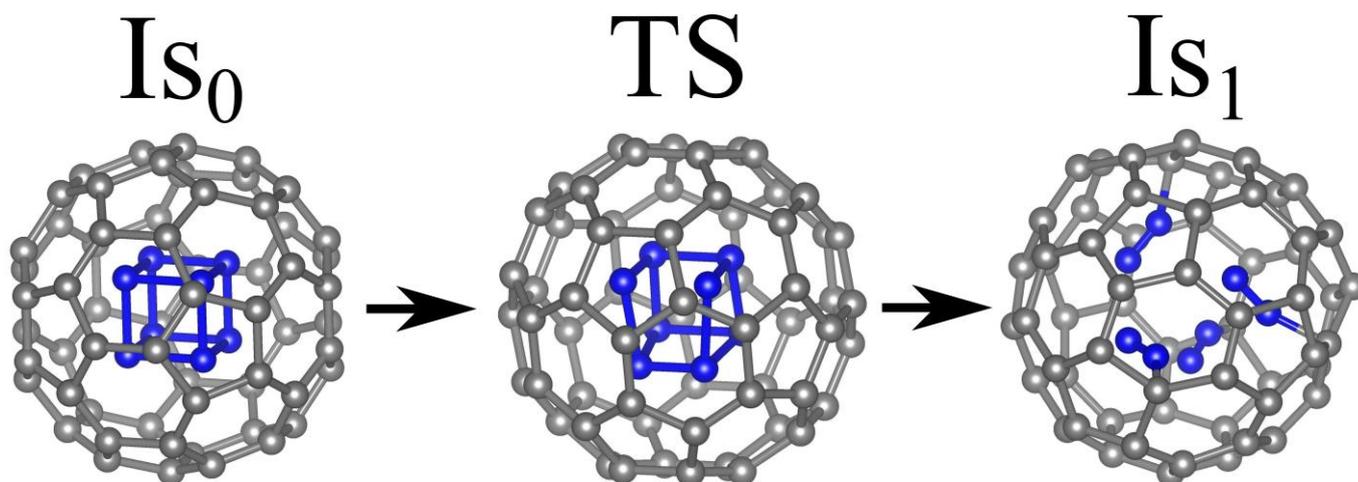


Иллюстрация механизма распада кубана N_8 внутри фуллерена C_{60} . Обозначение Is_0 соответствует неискаженной конфигурации $N_8@C_{60}$, TS – переходному состоянию или седловой точке, Is_1 – продукту распада, который представлен четырьмя отдельными молекулами азота, ковалентно связанными с внутренней поверхностью фуллереновой клетки.

В итоге, авторы приходят к выводу, что синтез основанных на фуллеренах эндодральных комплексов, включающих немолекулярный азот, возможен лишь при криогенных температурах. С другой стороны, фуллерены вполне способны выполнить функцию топливного контейнера при правильном подборе соединений “хозяина” и “гостя” в комплексе. Авторы рассчитывают, что представленные результаты стимулируют дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования эволюции азотных материалов с высокой плотностью энергии внутри углеродных каркасов.

М. Маслов

I. M.A. Gimaldinova et al., Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures **28** (2020); <https://doi.org/10.1080/1536383X.2019.1708730>

КОНФЕРЕНЦИИ

International Quantum Complex Matter Conference 2020 (QCM2020), June 8-12, 2020, Frascati (Rome), Italy

QCM2020 will highlight recent advances in all major fields in quantum phenomena in complex condensed matter. This is a multi-purpose meeting of activities based on the Frontiers of Condensed Matter Physics (FCMP) lecture courses and selected topics of Superstripes conferences. Invited and leading contributed papers will focus on research sub-fields of correlated electron systems (superconductivity and magnetism, Mott transition, quantum criticality, multi-band Hubbard model, Lifshitz transitions), nano science (graphene, TMDC, QHE, topological and 2D materials, Fano resonances), spintronics (Skyrmions, itinerant electron magnetism, spin current, magnetic memory), cold atoms (Hubbard Model, Feshbach Resonances, BEC-BCS crossover), complex systems (nanoscale phase separation), High Pressure Physics and Room Temperatures Superconductors to promote discussions and collaboration among researchers of different sub-fields.

The QCM 2020 conference is integrated with QCM 2020 School with Educational Courses for students and young researchers. The lecture contents of the course will be announced later.

Sessions on Hot topics

- 1) Dynamic Superconductivity
- 2) Frontiers of Pump Probe experiments
- 3) Planckian Dissipation
- 4) Twisted Superconductivity
- 5) Exotic 2D physics

Deadlines

February 29, 2020: Deadline for Registration and Abstract submission

June 8, 2020: Opening session

June 12, 2020: Closing session

July 31th, 2020: Submission of presented Papers for the proceedings on journal Condensed Matter

E-mail: qcm2020@ricmass.eu

Web site:

<https://www.superstripes.net/conferences/qcm-2020-the-conference>

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

Главный редактор: И.Чугуева, e-mail: ichugueva@yandex.ru

Научные редакторы К.Кугель, Ю.Метлин

В подготовке выпуска принимали участие О.Алексеева, М.Маслов, А.Пятаков

Выпускающий редактор: И.Фурлетова

Адрес редакции: 119296 Москва, Ленинский проспект, 64