



МАГНИТНОЕ ОБЩЕСТВО

Магнитное общество – МООСМ "Магнитное Общество" – самостоятельная творческая профессиональная общественная организация, объединяющая на добровольных началах специалистов, связанных с решением научных, научно-технических и производственных задач магнетизма.

БЮЛЛЕТЕНЬ

Гл. редактор: д.ф.-м.н. А.П. Пятаков

ТОМ 16

июнь 2015 г.

№2



ПРИВЕТСТВУЕМ УЧАСТНИКОВ

*Spin physics, spin chemistry
and spin technology"*
(SPCT-2015)

и

*Международного симпозиума
«Spin waves 2015»!*



Поздравляем юбиляра!



Академик РАН,
президент МГТУ
МИРЭА,
Вице-президент
Магнитного
Общества,
**Александр
Сергеевич Сигов**

Настоящий номер приурочен к двум конференциям, проводимым в июне: Международной Конференции по спиновой физике, химии и технологии SPCT-2015 и Международному симпозиуму «Spin waves 2015». Номер содержит обзор, посвященный перспективам практического применения мультиферроиков, а также традиционную подборку новостей магнетизма.

Международная конференция SPCT-2015 проводится с 1 по 5 июня 2015 года в Санкт-Петербурге. Конференция соберет около 200 участников. Тематика конференции охватывает вопросы спиновой физики химии и технологий. Конференцию совместно организуют два физико-технических института: имени Иоффе в Санкт-Петербурге и казанский институт имени Е.К. Завойского.

Международный симпозиум по спиновым волнам Spin Waves-2015, проводимый с 7 по 13 июня 2015 года в Санкт-Петербурге, продолжает традицию двухгодичных конференций, предоставляющих площадку для обсуждения новых успехов в изучении динамических свойств магнитоупорядоченных сред. Конференция организуется Физико-техническим Институтом им. Иоффе Российской Академии наук.

31 мая 2015 года признанному в стране и за рубежом специалисту в области физики твердого тела, академику РАН, доктору физ.-мат. наук профессору А.С. Сигову исполнилось 70 лет! А.С. Сигов автор монографий, учебных пособий, научных статей, изобретений. Он создал научную школу и в ее рамках организовал кафедру, ведущую подготовку по новым специализациям в области фундаментальных и прикладных проблем физики диэлектриков.

А.С. Сигов ведет большую научно-организационную работу: он входит в Научный совет при Совете Безопасности РФ, является заместителем председателя Межгосударственного совета по микронаномехатронике, заместителем председателя Научного совета РАН по физике сегнетоэлектриков и диэлектриков, членом Европейского физического общества и Института электроинженеров (Англия). Входит в состав редакционных коллегий и советов международных и российских журналов.

Магнитное Общество и магнитная общественность России сердечно поздравляют Вас, глубокоуважаемый Александр Сергеевич, с юбилеем! Здоровья и успехов Вам! Желаем Вам новых творческих достижений и плодотворной работы на ниве Российской науки и образования!

Правление и Дирекция Магнитного Общества

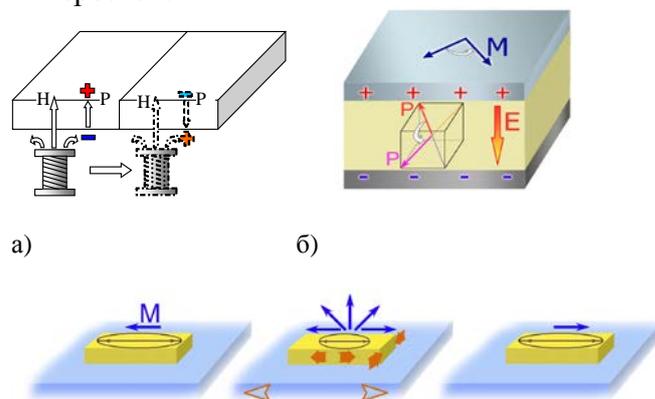
*Желаем успешного проведения конференций
и приятного летнего отдыха!*

АКТУАЛЬНО**Магнитные сегнетоэлектрики
и магнитоэлектрические
материалы: практические
аспекты**

Магнитные сегнетоэлектрики (часто называемые мультиферроиками) и магнитоэлектрические материалы – вещества, в которых в разных формах проявляются взаимосвязь магнитной и электрической подсистем. О практических приложениях магнитоэлектрического (МЭ) взаимодействия начали говорить во второй половине прошлого века [1], когда первенство в исследовании магнитоэлектрических веществ удерживалось советскими учеными, а мультиферроики назывались более точным и понятным нам термином *сегнетомагнетики* [2]. Однако практическому применению мешало отсутствие сред, проявляющих заметный МЭ эффект при комнатных температурах. Вторая волна интереса к этим материалам поднялась в начале текущего столетия. Было открыто множество новых высокотемпературных магнитоэлектриков и достигнут существенный прогресс в понимании механизмов МЭ взаимодействия, что нашло отражение в многочисленных обзорах, в том числе и на русском языке [3,4]. И хотя публикационная активность год от года только возрастает, сведения о коммерческих продуктах с использованием магнитоэлектрических эффектов практически отсутствуют, если не считать пресс-релиза 2006 года фирмы *Fujitsu* [5], в котором предполагалось использовать в элементах оперативной памяти FRAM пленки феррита висмута, но только лишь в их сегнетоэлектрической ипостаси, без привлечения магнитных свойств. В данном обзоре мы рассмотрим, как изменилась ситуация с момента написания обзора 2012 года [4], в котором также было уделено большое внимание практическим приложениям: каков прогресс достигнут, какие трудности еще остаются на пути практического использования, и какие новые идеи появились за это время.

МЭ элементы компьютерной памяти

Использовать магнитоэлектрические домены в качестве битов информации для нужд компьютерной памяти предлагалось еще в 1960-х годах [1]. Достоинством такого подхода являлось то, что МЭ домены не создают полей размагничивания, а значит не воздействуют друг на друга, но будучи внесенными во внешнее магнитное поле, они электрически поляризуются, что позволяет считывать с них информацию (рис.1.а). До сих пор в этом направлении не было заметного продвижения, хотя идея сама по себе весьма интересная.



в)
Рис. 1 Запоминающие устройства на МЭ эффектах:
а) память на МЭ доменах [1] б) переключение поляризации и намагниченности в феррите висмута [6]
в) магнитоэлектрически-ассистированная запись (эксцентриситет эллипса показывает величину анизотропии, стрелки показывают деформации) [7]. Элемент памяти из магнитоэлектрического материала (показан желтым) лежит на слое пьезоэлектрика (показан голубым).

Всеобщее увлечение сегнетомагнетиком ферритом висмута повело развитие МЭ памяти по другой дороге – переключение спонтанной намагниченности за счет электрического поля. Причем в ряде статей этот процесс подается как разворот намагниченности на 180 градусов при смене полярности подаваемого напряжения, что далеко от истины (характерные упрощения и заблуждения на этот счет критически разобраны в обзоре [8]). В реальности ситуация намного сложнее (рис. 1. б): под действием приложенного напряжения электрическая поляризация в ячейке на основе феррита висмута может опрокинуться в четыре равноценных положения вдоль направлений главных диагоналей куба, при этом только два из них соответствуют сценарию, при котором

намагниченность изменит направление (на рисунке 1б как раз показан такой желательный сценарий поворота). Для того чтобы процесс переключения был детерминирован, нужно снимать симметричное вырождение либо приложением постоянного магнитного поля, либо с помощью наведенной анизотропии в плоскости. Поворот намагниченности в таких ячейках составляет только 90 градусов, что является фактором, затрудняющим детектирование состояния ячейки, поскольку он вдвое меньше того, что наблюдался бы при 180-градусном переключении.

В последние три года возобладал более прагматичный подход: не стоит пытаться осуществить чисто МЭ переключение, лучше использовать электрическое поле в качестве «ассистента» при классическом перемагничивании. Такой подход стал называться Magnetoelectric Assisted Recording (запись, ассистируемая магнитоэлектричеством) [7] по аналогии с Heat Assisted Recording (запись с подогревом) – стратегией, которой будут придерживаться компании при производстве магнитных жестких дисков следующего поколения. Электрическое поле может ослаблять магнитную анизотропию образца и облегчать переход в состояние с противоположной ориентацией намагниченности. На рис.1 в) показана реализация такого элемента памяти на основе композитного МЭ материала: электрическое поле вызывает деформацию подложки из пьезоэлектрика. Механическое напряжение передается магнитострикционному материалу, изменяя его анизотропию [7].

Недавно вышла работа [9], в которой для различных способов переключения состояний в ячейках компьютерной памяти проводится сравнение эффективности, то, что называется в зарубежной индустрии «бенчмаркингом» (benchmarking). Сравнительный анализ показывает (рис. 2), что магнитоэлектрические способы переключения значительно менее энергозатратны, чем применяемые в настоящее время в спинтронике методы переключения спин поляризованным током. По энергии переключения они вполне конкурентноспособны с классической интегральной электроникой, основанной на КМОП технологии, но уступают последним по скорости переключения (рис.2). При этом не

стоит забывать, что главным преимуществом спинтронных устройств, как на спиновом транспорте, так и магнитоэлектрических, является их энергонезависимость – возможность сохранять информацию при отключении питания.

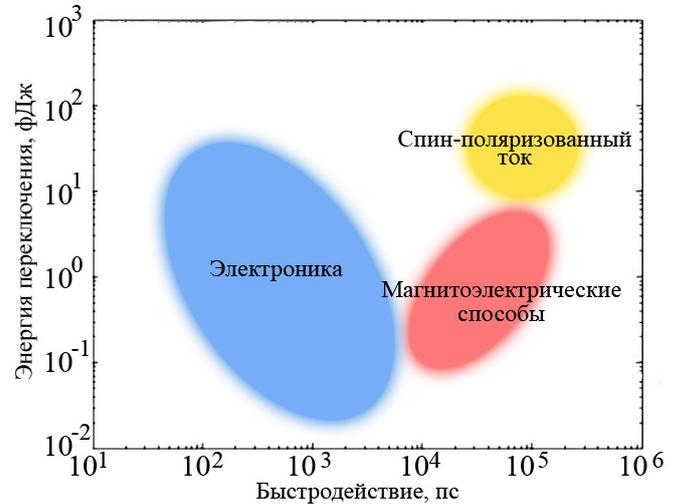


Рис. 2 Диаграмма сравнения различных способов переключения в кремниевой электронике (область, показанная голубым цветом), и в спинтронике за счет эффекта переноса спина (желтая область) и магнитоэлектрических эффектов (красная область) [9].

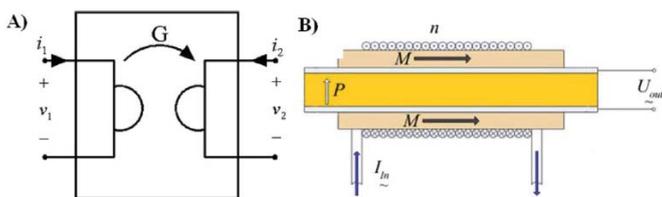
МЭ магнитные сенсоры

Естественным приложением магнитоэлектрического эффекта было бы его использование в сенсорах магнитного поля, поскольку становится возможным создание пассивных (не требующих питания) и чувствительных датчиков, которые могут составить конкуренцию традиционным датчикам Холла и магниторезистивным элементам. Современное положение в этой области обсуждается в обзоре [10]. Тенденцией последних лет при создании МЭ сенсоров стало использование MEMS – технологий (микроэлектромеханических систем). С помощью них можно на кремниевой подложке заданной формы создавать многослойные композитные структуры из магнитострикционных и пьезоэлектрических материалов. Такие структуры обладают рекордными значениями МЭ эффекта за счет усиления при электромеханическом резонансе исчисляющимися десятками кВ/(см·Э) [11] (при том, что в классическом магнитоэлектрике Cr_2O_3 он составляет лишь 30 мВ/(см·Э) – усиление в миллионы раз!).

Чувствительность можно повысить еще в несколько раз в условиях среднего вакуума [11].

Гиратор Теллегена

Еще одна идея, долго ждавшая своего технического воплощения – гиратор Теллегена. В 1948 году американский электронный инженер Бернард Теллеген, работавший в исследовательской лаборатории фирмы «Филипс», предложил гипотетический «пятый элемент», в дополнение к уже известным в электротехнике резистору, конденсатору, индуктивности и трансформатору [12]. Это устройство благодаря свойству обращать импеданс было названо «гиратором» (от греч. «гирос»- круг). Замкнутые клеммы на одном выходе означает бесконечное сопротивление на входе, если же к одному входу гиратора подключить индуктивность, то импеданс другого входа будет проявлять емкостные свойства и наоборот. По замыслу Теллегена основой гиратора должен был стать магнитоэлектрический материал, однако позднее он был реализован на схеме с операционным усилителем. Воплотить в жизнь первоначальную идею Теллегена удалось в текущем столетии на основе композитного магнитоэлектрического материала (рис. 3) [13]. Подача тока на вход гиратора вызывала магнитное поле, которое преобразовалось МЭ материалом в электрическое напряжение на выходе.



а) Рис. 3 а) условное обозначение гиратора, введенное Теллегеном [12] б) техническое воплощение на основе композиционного материала [13].

Фотовольтаика и другие приложения в фотонике

Обнаружение ярко выраженных фотогальванических свойств мультиферроиков явилось побочным продуктом исследований феррита висмута. Мультиферроику, как сегнетоэлектрическому веществу, присущ объемный фотогальванический эффект:

рождающаяся в результате поглощения фотона электронно-дырочная пара расходится в разные стороны за счет внутреннего электрического поля. В отличие от аналогичного эффекта в p-n переходе, напряжение, снимаемое с фотовольтаического элемента на основе сегнетоэлектрика, не ограничено шириной запрещенной зоны и пропорционально толщине образца, на которой происходит разделение зарядов (рис. 4).

Приятным сюрпризом оказался другой неожиданный эффект, который до сих пор не имеет убедительного объяснения: в сегнетомагнетиках запрещенная зона меньше, чем в обычных сегнетоэлектриках без магнитного упорядочения (1,5-2 эВ против 3-6 эВ), что позволяет использовать не только высокоэнергетическое ультрафиолетовое излучение, но и свет видимого диапазона [14].

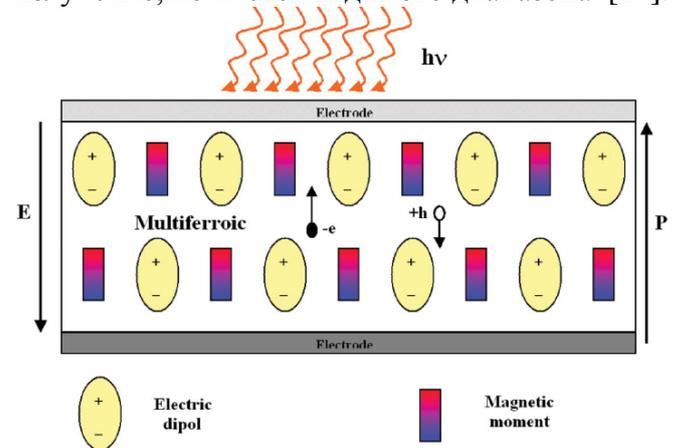


Рис. 4 Фотовольтаический эффект в магнитном сегнетоэлектрике [14].

Мультикалорики

И, наконец, в последние два года родилась совсем новая идея мультикалорического охлаждения [15-18].

Задача создания систем твердотельного охлаждения наиболее остро стоит в интегральной электронике, где традиционные компрессионные методы неприменимы. Наиболее изученным способом твердотельного охлаждения является магнитокалорический эффект [19]. Позже были обнаружены электрокалорический [20] и эласто-калорический эффекты [21].

Наличие перекрестных эффектов, проявляющихся в гигантском увеличении магнитокалорических свойств при механическом напряжении пленок (LaCa)MnO₃

[22] или аномальный рост электрической поляризации вблизи температуры Нееля в мультиферроике BaMnF_4 [23] подготовило почву для введения понятия мультикалорического эффекта [14,15]. Совместное действие магнитного и электрического полей позволяет упорядочивать как магнитную, так и электрическую подсистемы (рис. 5), позволяя «выжать максимум» изменения энтропии. В настоящее время достигнут 10%-ный рост эффективности твердотельного охлаждения по сравнению с чисто магнитокалорическим методом.

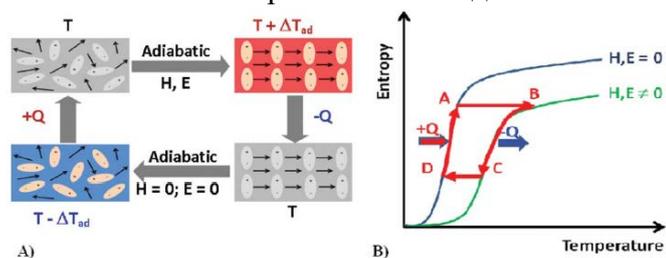


Рис. 5 Мультикалорический цикл охлаждения [14]

Литература

1. O’Dell T.H. Magnetolectrics - a new class of materials// Electronics and power. – 1965. – V.11. – P. 266.
2. Смоленский Г.А., Чупис И.Е., Сегнетомагнетики // УФН. 1982. – Т.137. – С. 415-448.
3. Чупис И.Е. Прогресс в изучении сегнетомагнитных кристаллов // Физика Низких Температур. - 2010.–Т. 36. –С. 597-612
4. Пятаков А.П., Звездин А.К. Магнитоэлектрические материалы и мультиферроики // УФН. – 2012. – Т. 182. – С. 593-620.
5. K. Maruyama, M. Kondo, S.K. Singh, H. Ishiwara, FUJITSU Sci. Tech. J. **43**, 502 (2007)
6. J. T. Heron, D. G. Schlom, R. Ramesh, *Electric field control of magnetism using BiFeO3-based heterostructures*, Appl. Phys. Rev. **1**, 021303 (2014)
7. Zh. Wang et al, Magnetolectric Assisted 180 Magnetization Switching for Electric Field Addressable Writing in Magnetoresistive Random-Access Memory, ACS Nano. **8**, 7793 (2014)
8. А.И. Морозов, Переключение намагниченности ферромагнетика электрическим полем (Обзор), ФТТ, **56**, 833 (2014)

9. Dmitri E. Nikonov and Ian A. Young, Benchmarking spintronic logic devices based on magnetoelectric oxides, J. Mater. Res., **29**, 2109 (2014)
10. Y. Wang, J. Li and D. Viehland, Magnetolectrics for magnetic sensor applications: status, challenges and perspectives, Materials Today, **17**, с. 269 (2014)
11. Ch.Kirchhof et al, Giant magnetoelectric effect in vacuum, Appl. Phys. Lett. **102**, 232905 (2013)
12. Tellegen B.D.H. The gyrator, a new electric network element//Philips Res. Rep. – 1948. – V. 3. – P. 81.
13. J. Zhai et al, Magnetolectric gyrator Eur. Phys. J. B **71**, 383–385 (2009)
14. M.M. Vopson: *Fundamentals of Multiferroic Materials and Their Possible Applications*, Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, DOI: 10.1080/10408436.2014.992584
15. M.M. Vopson, Solid State Commun. **152**, 2067 (2012).
16. Ch. Binek, V. Burobina, Appl. Phys. Lett. **102**, 031915 (2013).
17. Старков А.С., Старков И.А., Мультикалорический эффект в твердом теле: новые аспекты, ЖЭТФ, **146**, 297 (2014)
18. И.Н. Флёрв и др., Калорические и мультикалорические эффекты в кислородных ферроиках и мультиферроиках, Физика твердого тела, том **57**, 421 (2015)
19. А.С. Андреевко, К.П. Белов, С.А. Никитин, А.М. Тишин, Магнитокалорические эффекты в редкоземельных магнетиках, УФН, **158**, 553–579 (1989)
20. A. S. Mischenko et al. Giant Electrocaloric Effect in Thin-Film $\text{PbZr}_{0.95}\text{Ti}_{0.05}\text{O}_3$. Science **311**, 1270–1271 (2006)
21. E. Bonnot et al, *Elastocaloric Effect Associated with the Martensitic Transition in Shape-Memory Alloys*, Phys. Rev. Lett. **100**, 125901 (2008).
22. J. P. Rivera, Ferroelectrics **161**, 165–180 (1994).
23. А.К. Звездин и др. Квадратичный магнитоэлектрический эффект и роль магнитокалорического эффекта в магнитоэлектрических свойствах мультиферроика BaMnF_4 , ЖЭТФ **136**, 265 (2009).

ЗАРУБЕЖНЫЕ ЖУРНАЛЫ И САЙТЫ

Магнитные “наноконтрабандисты”

Природа надежно защитила наш мозг от влияния посторонних веществ или микроорганизмов, циркулирующих в нашем кровотоке, выставив на их пути гематоэнцефалический барьер – механизм, включающий несколько способов защиты, в том числе избирательную проницаемость мембран клеток, отлавливающих крупные молекулы.



Обратной стороной наличия такого барьера являются трудности, с которыми сталкиваются медики при лечении заболеваний центральной нервной системы: лишь ничтожно малая часть препарата, введенного внутривенно, попадает в ткани мозга.

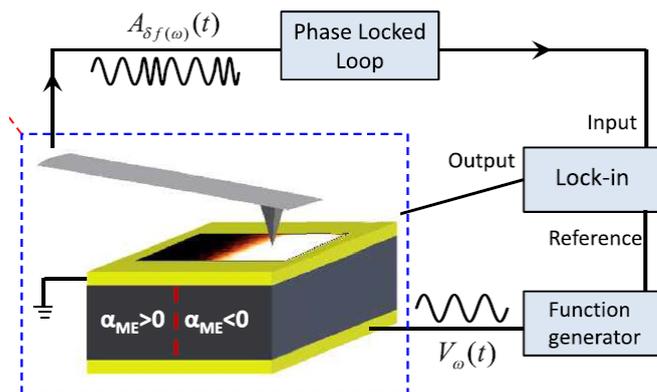
Магнитные наночастицы, благодаря своему малому размеру, преодолевают этот барьер. Это позволяет их использовать в качестве «контрабандистов», для переноса лекарственных веществ через границу между кровеносной системой и мозгом. Как недавно обнаружили ученые из Университета Монреаля, тепловой нагрев наночастиц в переменном магнитном поле приводит к расширению межклеточных промежутков и временному открытию барьера в месте расположения наночастиц, позволяя ввести медицинские препараты. Данный способ должен быть более щадящим, по сравнению с ранее применяемыми способами, приводящими к длительному нарушению барьера.

26 марта 2015/ Новостной сайт Gizmag.com
New and Emerging Technology News

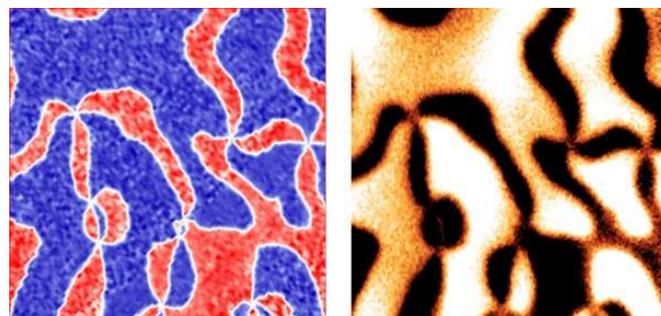


Новый вид атомной силовой микроскопии

В обширном семействе сканирующих зондовых микроскопов снова пополнение: появилась магнитоэлектрическая (МЭ) силовая микроскопия. Она является ответвлением магнитной силовой микроскопии (МСМ) и создана для исследования поверхностей МЭ материалов и мультиферроиков (подробнее об этих материалах и их практическом использовании см. обзор на с. 2).



Принципиальная МЭ силовой микроскопии. К МЭ материалу прикладывается переменное электрическое поле, приводящее к изменению намагниченности, которое детектируется с помощью магнитного зонда МСМ. Малый МЭ сигнал усиливается методом синхронного детектирования [Rev. Sc. Instr. 85, 053901].



Сегнетоэлектрические домены, визуализированные с помощью силовой микроскопии пьезоэлектрического отклика (слева), и магнитоэлектрические домены, соответствующие им в магнитоэлектрическом зондовом микроскопе (справа).

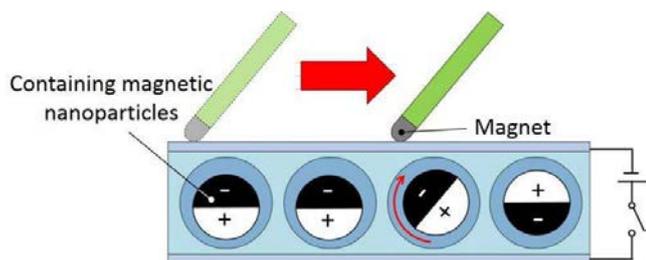
Этот новый вид атомной силовой микроскопии призван обнаруживать магнитоэлектрические домены, что крайне важно при создании устройств на МЭ эффекте: чем меньше в материале доменов, тем сильнее его магнитоэлектрический отклик.

27 апреля 2015/ Новостной сайт Phys.org



Электронная бумага становится все ближе к обычной

Электронная бумага пока еще значительно уступает обычной как по дешевизне, так и по возможности свободно на ней рисовать (интерактивным e-ink дисплеем оснащена вторая версия йотафона, но он отнюдь не дешев — *прим. ред.*). Японские ученые из Токийского Университета вдохнули новую жизнь в уже полузабытую идею электронной бумаги на вращающихся сферах (гириконе): они реализовали простой способ нанесения изображений с помощью магнитного стилуса.



Рисование магнитным стилусом на электронной бумаге

Каждая частица гириконе представляет собой сферическую полиэтиленовую частицу диаметром около 100 мкм, одна полусфера которой окрашена в белый, другая в черный цвет. Темная полусфера окрашена тонером, несущим отрицательный заряд (как в лазерном принтере), что позволяет поворачивать частицы с помощью электрического поля. Если примешать к тонеру магнитный порошок, то сферические частицы становятся чувствительными и к магнитному полю. Читатель, возможно, узнает в этой идее принцип действия игрушечных магнитных экранов, но в отличие от них, стирание изображения производится не механически, а подачей напряжения, как в электронных дисплеях.

От редакции добавим, что идея магнитного гириконе также не нова, об этом писалось в 4-м номере Бюллетеня МАГО 2008 года «*История о том, как скрестили магнит с дисплеем*», но тогда это устройство подавалось как реализация идеи Б. Теллегена об искусственной магнитоэлектрической среде.

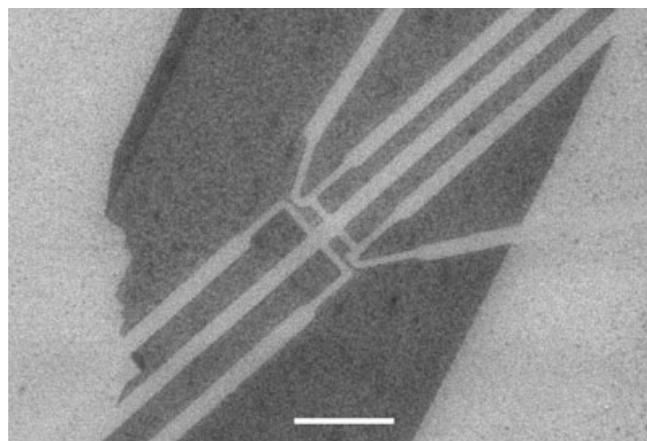
21 апреля 2015/ Новостной сайт Phys.org



Разлучение куперовских пар с помощью графена

Именно такой задачей озаботилась российско-финская группа исследователей из ИТФ РАН в Черноголовке и Университета Аалто в Хельсинки.

Для чего нужно расщеплять электронные пары, благодаря которым становится возможной сверхпроводимость? Дело в том, что запутанное состояние, в котором находится пара, необходимо для осуществления квантовых вычислений, только нужно развести электроны пары подальше друг от друга, сохранив при этом их запутанное состояние.



Структура, полученная методом электронно-лучевой литографии в графене (до напыления сверхпроводящих контактов). Светло-серая – подложка из оксида кремния, темно-серая – пленка графена. Длина масштабной метки – 1 мкм.

Лучше всего процесс расщепления может быть проведен с помощью квантовых точек – ограниченных в трех измерениях резонаторов для электронов. Ученым удалось создать такие квантовые точки в графене – материале, привлекательном прежде всего своей большой длиной свободного пробега и малым спин-орбитальным взаимодействием (а значит большим временем спиновой когерентности). С помощью такой структуры удалось получить эффективность расщепления куперовских пар 10%, что даже несколько больше, чем ожидалось.

10 марта 2015/ IOP
Physicsworld.com

**Конференции и школы
по магнетизму и магнитным материалам,
на которые открыт прием заявок.**

Даты проведения (дедлайн)	Название конференции	Место проведения	Контактная информация
21-25 сентября (10 июня)	<i>XX международная конференция по постоянным магнитам МКПМ-2015</i>	Суздаль, Россия	http://permanentmagnet.ru
15-19 сентября (15 июня)	<i>Пятый междисциплинарный, международный симпозиум "Среды со структурным и магнитным упорядочением» (Multiferroics-5)</i>	г. Ростов-на-Дону п. Южный	org.multiferroics@gmail.com
14-18 сентября (15 июня)	<i>HSC18: Neutrons and Synchrotron Radiation for Magnetism (курсы – Hercules Specialized Courses)</i>	Гренобль, Франция	http://www.esrf.eu/events/conferences/HSC/HSC18
9-12 сентября (20 июня)	<i>International Meeting on Materials for Electronic Applications: IMMEA – 2015</i>	Марракеш, Марокко	http://www.immea.ferroix.net
7-11 сентября (17 июля)	<i>SpinIcur Summer School 2015 Spintronics - Spin currents and magnetism</i>	Брага, Португалия	http://www.spinicur.org/index.php/suimmerschool
2-4 декабря (20 июля 2015)	The International Conference on Magnetic Materials and Applications (ICMAGMA – 2015)	Веллор, Индия	http://www.info.vit.ac.in/icmagma/about.html
11-15 января 2016 (7 августа 2015)	MMM INTERMAG	Сан-Диего, США	http://www.magnetism.org



Выпуск подготовлен при поддержке компании ООО «Полимагнит» — одного из ведущих поставщиков магнитных материалов и технологий на российском рынке. Сайт компании: <http://www.amtc.ru>

Редколлегия:

Главный редактор: А.П. Пятаков

Научные редакторы: М.П. Шорьгин, В.А. Сеин, А.М. Тишин

Худ. редактор и корректор: З.А. Пятакова

Информация для авторов: редакция Бюллетеня осуществляет быструю публикацию информации, представляющей значительный интерес для членов общества. Работы просьба присылать по электронному адресу редакции: bulletin.mago@gmail.com Редакция осуществляет рецензию полученных работ и оставляет за собой окончательное решение об их публикации в Бюллетене.

Электронный архив бюллетеня расположен на сайте: <http://www.amtc.ru/news/bulluten>