



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 17

май 2016 г.

№1-2

Памяти Л.А. Прозоровой

Номер содержит обзор А.П. Пятакова, посвященный новому направлению электроники – стрейнтроники, а также подборку новостей магнетизма и информацию о новых конференциях по магнетизму.

МАГНИТИНФОРМ

Уважаемые члены Магнитного Общества, приглашаем вас на Конференцию МАГО, которая состоится во **вторник 24 мая** в 17:00 на физическом факультете МГУ в многофункциональном зале библиотеки физического факультета (5 этаж).

Программа конференции:

О работе Магнитного Общества. Выборы.



Член-корр. РАН,
профессор
**Людмила
Андреевна
Прозорова**
(1928 – 2016)

27 апреля 2016 года отечественная наука, Академия наук и магнитное сообщество понесли тяжелую утрату – с нами не стало обаятельного человека, выдающегося ученого, члена корреспондента РАН, председателя секции «Магнетизм» научного Совета РАН Людмилы Андреевны Прозоровой.

Людмила Андреевна родилась 8 октября 1928 г. в Москве. Школьные годы Людмилы Андреевны пришлось на время войны. По возвращении из эвакуации она поступает на физический факультет МГУ, дипломную практику и аспирантуру проходит в Институте Физических проблем, с которым и будет связана вся ее дальнейшая научная жизнь.

Л.А. Прозоровой принадлежат основополагающие экспериментальные работы в области спиновой динамики: исследование различных проявлений антиферромагнитного резонанса, открытие параметрического возбуждения магнонов в антиферромагнетиках, обнаружение отрицательного нелинейного затухания, взаимодействия магнонов между собой и другими квазичастицами и др. Широко известен цикл работ Л.А. Прозоровой о "треугольных" антиферромагнетиках, открывший многие эффекты в магнитных кристаллах, в которых фрустрация сочетается с пониженной размерностью спиновой подсистемы.

Память о ней – замечательном исследователе и никогда не унывающем человеке – навсегда сохранится в наших сердцах.



Желающим принять участие в заседании просьба **не позднее 23 мая** прислать свои ФИО (полностью) Пятакову Александру Павловичу pyatakov@physics.msu.ru для оформления списков на проходной физического факультета.

АКТУАЛЬНО

Стрейнтроника – скромная падчерица спинтроники

Одним из потенциальных преимуществ спиновой электроники считается ее чрезвычайно низкое энергопотребление. Как было показано в работе десятилетней давности¹, минимальная энергия, необходимая для переключения логического состояния элемента в устройствах спинтроники в N раз меньше, чем в полупроводниковых электронных элементах, где N – число носителей информации (электронов или дырок), кодирующих один бит в традиционной электронике. Причиной тому служит коллективное поведение спинов атомов в магнитных нанозементах, вызванное обменным взаимодействием, заставляющим все спины двигаться синхронно, как один гигантский спин.

Однако при столкновении с реальностью этот идеальный образ сильно тускнеет: потери энергии при переключении намагниченности наноземента составляют лишь небольшую долю полной энергии, рассеиваемой в подводящих проводах, поскольку используемые на текущем уровне развития спинтроники плотности токов в нанопроводах достигают величин 10^6 - 10^7 А/см².

В результате вместо нескольких $k_B T$ при переключении расходуется 10^{11} - 10^{12} $k_B T$ при скорости переключения порядка 1 мкс, что делает такие схемы совершенно не интересными в практическом плане, проигрывающими современным полупроводниковым транзисторам на четыре порядка по энергии переключения и на три порядка по быстродействию².

И здесь исследователи обратились к возможности изменения магнитной анизотропии элемента за счет магнитоэлектрического эффекта при его механической деформации. Ранее такая схема предлагалась в качестве вспомогательного приема при магнитной записи³⁻⁵. С началом текущего десятилетия это направление выделилось в отдельную область *стрейнтроники*² (от англ. *strain* — натяжение).

Магнитоэлектрическая путевка в жизнь

Пока не было придумано простого и совместимого с традиционной микроэлектроникой способа создания локальных механических напряжений все схемы переключения магнитных элементов за счет механической деформации оставались умозрительными (в самом деле, не зажимать же элемент в нанотиски!).

Стрейнтроника как отдельная ветвь спинтроники стала возможной благодаря параллельному развитию физики и технологии магнитоэлектрических материалов⁶. Один из способов связать статическое электричество и магнетизм – создать композиционный материал из пьезоэлектрика и магнитоэлектрического материала⁷.

На рис. 1 а) показан простейший элемент на основе слоистого магнитоэлектрического композита: магнитное поле вызывает деформацию магнитоэлектрического слоя. Механическое напряжение передается пьезоэлектрическому слою, в котором оно преобразуется в электрическое напряжение.

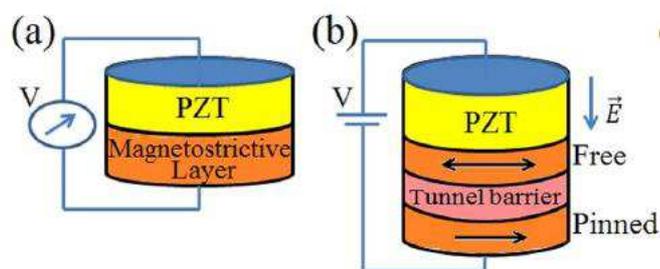


Рис.1. Элементы с использованием магнитоэлектрических композитов⁸: а) датчик магнитного поля; б) стрейнтронный элемент – сочетание магнитоэлектрического композита и магнитного туннельного перехода.

Обратный эффект – наведенное электрическим напряжением изменение магнитной анизотропии в магнитоэлектрическом слое можно использовать в стрейнтронике. Схема сэндвич-структуры стрейнтронного элемента показана на рис. 1б. Эллиптическая форма элемента задает первоначальное направление оси легкого намагничивания (показана обоюдоострой стрелкой). После приложения электрического напряжения ось легкого намагничивания поворачивается к нам, образуя прямой угол с первоначальным направлением, таким образом, создавая возможность переключения

намагниченности в магнитомягком «свободном» слое. Изменение магнитного состояния элемента считывается с помощью расположенного ниже устройства на магнитном туннельном переходе: электрическое сопротивление туннельного контакта свободного (Free) и закрепленного (Pinned) слоев зависит от взаимной ориентации намагниченности в них (см. рис. 1б). Данное устройство может использоваться как элемент магнитной памяти и логических схем.

Стрейтроника оказывается многообещающим подходом не только в цифровой технике, но и в аналоговых логических устройствах⁶. Сравнительный анализ устройств электроники и спинтроники показывает (рис. 2), что стрейтронные методы переключения значительно менее энергозатратны, чем применяемые в настоящее время в спинтронике способы переключения спин поляризованным током. По энергии переключения они вполне конкурентоспособны 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 спин-поляризованных токах, так и стрейтронных, является их энергонезависимость – возможность сохранять информацию при отключении питания.

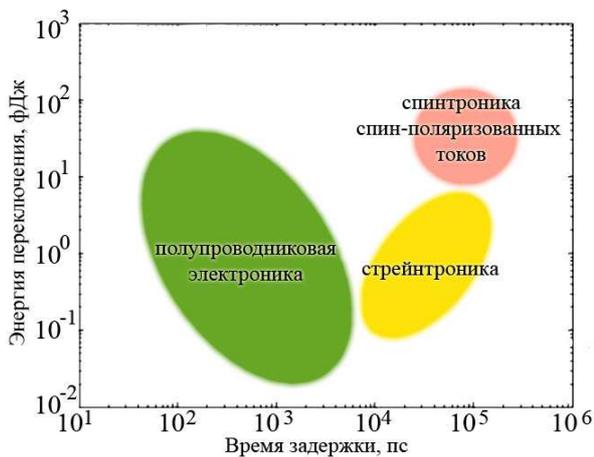


Рис. 2 Сравнение различных способов переключения в кремниевой электронике (область, показанная зеленым цветом), в спинтронике за счет эффекта переноса спина (розовая область) и в стрейтронике (желтая область)⁹.

Стрейтронный синапс

Неожиданным приложением стрейтронных элементов стало построение на их основе искусственных нейронных сетей¹⁰

Устройство одного элемента показано на рис.3. Роль синапсов играет связка из резисторов на входе: токи складываются в общий сигнал, каждый входит в сумму со своим весом, в зависимости от величины резистора. Электрическое напряжение между электродами А и подложкой создает механическое напряжение пьезоэлектрической пленки, которое передается магнитным слоям магниторезистивной сэндвич-структуры (посередине). Благодаря эллиптической форме в таком элементе существует выделенное направление, вдоль которой намагничивается нижний магнитомягкий слой. Данное состояние с параллельно расположенными намагниченностями в верхнем и нижнем магнитных слоях соответствует минимальному сопротивлению. Под действием механического напряжения ось легкого намагничивания меняется на 90 градусов, изменяется направление намагниченности в нижнем слое и, как результат, сопротивление сэндвич – структуры увеличивается.

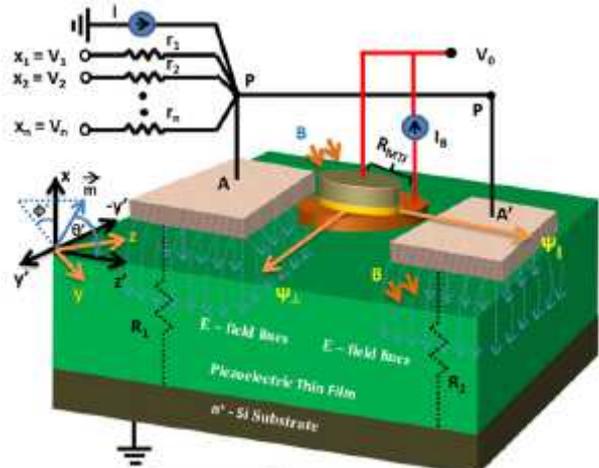
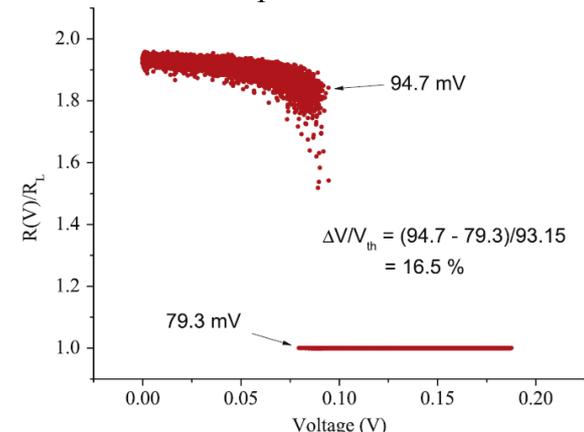


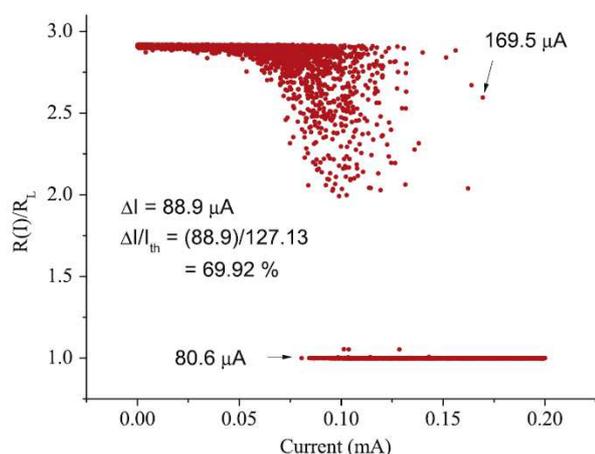
Рис. 3 Стрейтронный элемент искусственных нейронных сетей.

Численное моделирование такого элемента показывает, что стрейтроника не только позволяет радикально снизить расходуемую мощность до конкурентоспособных с полупроводниковой электроникой величин, но и сделать переходную характеристику более близкой к ступенчатой (рис.4), ослабив размывающее воздействие тепловых шумов¹⁰: ширина фронта для

стрейнтронного устройства составляет 16% от высоты ступеньки, в то время как для устройства на спин-поляризованных токах относительная ширина доходила до 70%.



а)



б)

Рис. 4 Переходная характеристика для стрейнтронного (а) и обычного спинтронного (б) устройств¹⁰.

Даже на текущем уровне развития с временами переключения 10-100 нс стрейнтронные элементы представляют интерес для тех областей, где не так важно быстрое действие, но критично низкое энергопотребление, например при использовании стрейнтронных устройств в качестве медицинских имплантатов и носимых устройств (wearables), подзаряжающихся от движения тела, а также в глубоководных и тензометрических датчиках, черпающих энергию из механических вибраций.

Принцип управления за счет локальных механических напряжений не обязательно предполагает воздействие на магнитные среды, а это значит, что стрейнтроника может скоро освободиться от роли «золушки» и начать независимую от спинтроники жизнь.

Литература

1. Salahuddin, S. & Datta, S. Interacting systems for self-correcting low power switching. *Appl. Phys. Lett.* **90**, 093503 (2007).
2. Roy, K., Bandyopadhyay, S. & Atulasimha, J. Hybrid spintronics and straintronics: A magnetic technology for ultra low energy computing and signal processing. *Appl. Phys. Lett.* **99**, 063108 (2011).
3. Iwasaki, Y. Stress-driven magnetization reversal in magnetostrictive films with in-plane magnetocrystalline anisotropy. *J. Magn. Magn. Mater.* **240**, 395–397 (2002).
4. McCord, J., Schäfer, R., Frommberger, M., Glasmachers, S. & Quandt, E. Stress-induced remagnetization in magnetostrictive films. *J. Appl. Phys.* **95**, (2004).
5. Atulasimha, J. & Bandyopadhyay, S. Bennett clocking of nanomagnetic logic using multiferroic single-domain nanomagnets. *Appl. Phys. Lett.* **97**, 173105 (2010).
6. Roy, K. Ultra-low-energy straintronics using multiferroic composites. *Proc. SPIE* **9167**, 91670U (2014).
7. Бичурин, М. И., Петров, В. М., Филиппов, Д. А. & Сринивасан, Г. *Магнитоэлектрический эффект в композиционных материалах. Монография.* (Издательство НовГУ, 2005).
8. Barangi, M. & Mazumder, P. Effect of temperature variations and thermal noise on the static and dynamic behavior of straintronics devices. *J. Appl. Phys.* **118**, 0–11 (2015).
9. Nikonov, D. E. & Young, I. a. Benchmarking spintronic logic devices based on magnetoelectric oxides. *J. Mater. Res.* **29**, 2109–2115 (2014).
10. Biswas, A. K., Atulasimha, J. & Bandyopadhyay, S. The straintronic spin-neuron. *Nanotechnology* **26**, 285201 (2015).

НОВОСТИ МИРОВОГО МАГНЕТИЗМА

Памяти Карла Гшнайдера

Сайт лаборатории Эймса сообщает, что в возрасте 85 лет ушёл из жизни профессор Карл Гшнайдер, один из крупнейших специалистов в области редкоземельных материалов.



Карл Гшнайдер внес значительный вклад в физику и технологию создания редкоземельных магнитных материалов (за что получил от коллег неофициальный титул «Mister Rare Earth»). Его работы по гигантскому магнитокалорическому эффекту вызвали в начале нынешнего столетия всплеск интереса к проблематике магнитного охлаждения.

Исследования проф. Гшнайдера отмечены рядом международных наград, он был удостоен членства в Национальной Академии инженерных наук США.



Карл Гшнайдер в лаборатории ООО ПМТК, г. Троицк (группа АМТ&С)

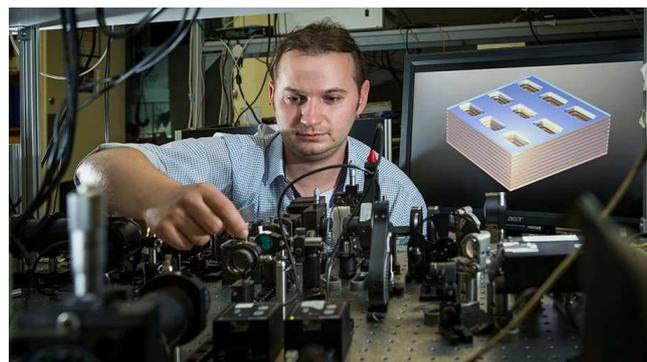
Карл Гшнайдер несколько раз приезжал в Россию и читал лекции, получившие высокую оценку среди российских специалистов. Он останется в памяти российских коллег как образец вдумчивого ученого и принципиального человека.

Сообщение на сайте Лаборатории Эймса <https://www.ameslab.gov/news/news-releases/mr-rare-earth-karl-gschneidner-passes-away-april-27>

ЖУРНАЛЫ И САЙТЫ

Гиперболоид Сергея Крука

Американско-австралийская команда ученых создала магнитные гиперболические метаматериалы, которые позволят создавать сверхэффективные термофотогальванические элементы, превращающие энергию инфракрасного излучения в электричество.



Сергей Крук демонстрирует прототип магнитной гиперболической среды

Гиперболическими называют среды, в которых продольная и поперечная составляющие тензора электрической или магнитной проницаемости имеют различный знак (в пространстве волновых векторов изочастотная поверхность имеет форму гиперboloида, отсюда название).

Материалы, в которых компоненты диэлектрической проницаемости имеют разные знаки известны давно, а вот магнитные гиперболические среды получены впервые. Теперь на основе «дважды гиперболических» сред становится возможным создание работающих в естественном (неполяризованном) свете левых материалов (с отрицательным показателем преломления), покрытий для фотоэлементов с волновым импедансом, согласованным со свободным пространством, а также суперлинз и других чудес оптики.

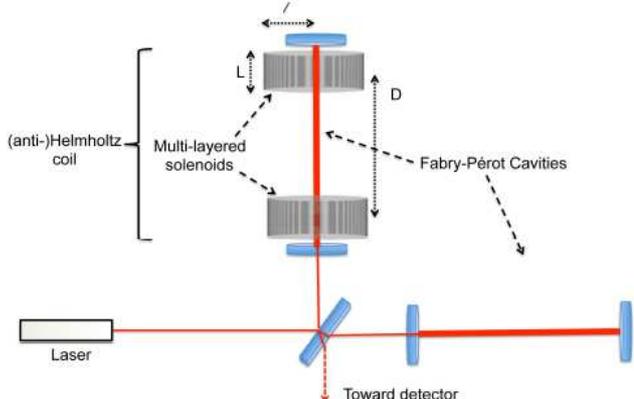
Метаматериал сам по себе представляет чудо техники. Как говорит первый автор [1] Сергей Крук: «Один его элемент 12 тысяч раз умещается на поперечном сечении волоса».

[1] S. Kruk et al, Nature Communications, 7, 11329
20 апреля 2016/ Новостной сайт Gizmag.com

Генерация гравитационных волн с помощью соленоида

На фоне шумихи, поднявшейся после сообщений о детектировании гравитационных волн, незамеченной осталась статья профессора Андре Фюцвы (A. Füzva) из бельгийского университета Намюр, предлагавшая ни много ни мало, как способ генерации гравитационных волн в лабораторных условиях с последующим их детектированием. Это звучит фантастично, учитывая, что в настоящее время ученым приходится ждать, пока в зоне чувствительности гравитационной антенны не произойдет какое-нибудь масштабное событие вроде слияния двух черных дыр.

Не менее удивителен предлагаемый метод генерации — с помощью магнитного поля от сильных электромагнитов (таких как используемые в ускорителях ЦЕРН). Однако, доказывает автор, эта идея базируется на тех же положениях общей теории относительности, что и соображения, приведшие к открытию гравитационных волн.

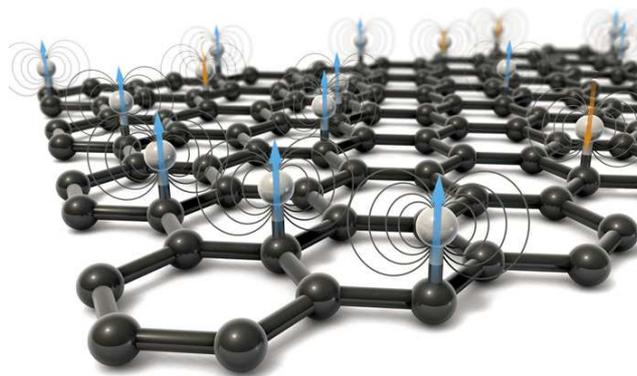


Принцип эквивалентности, лежащий в основе ОТО Эйнштейна, предполагает, что при генерации электромагнитных волн возникают и слабые возмущения пространственно-временной метрики, которые могут быть зафиксированы в интерферометрах Майкельсона, подобных тем, что составляют основу действующих гравитационных антенн, но с дополнительно введенным резонатором Фабри-Перо и соленоидами.

André Füzva; How current loops and solenoids curve spacetime; *Phys. Rev. D* **93**, 024014 (2016); arxiv.org/abs/1504.00333

Графен с водородной «приправой» становится магнитным

Уже спустя несколько лет после открытия графена появились его разнообразные производные, включая гидрогенизированный графен – графан. В нем каждый атом углерода связан не только с тремя соседями по графеновой решетке, но еще удерживает один атом водорода сверху или снизу от поверхности графена. Как показали исследователи из Автономного университета Мадрида, избирательно присоединяя атомы водорода к атомам углеродной решетки можно сделать графен магнитным.



Решетка графена с присоединенными к ней атомами водорода (серые шары). Две подрешетки графена проявляются в противоположном направлении спинов присоединенных к ним атомов водорода: «вверх» и «вниз» (синие и оранжевые стрелки, соответственно).

Далеко не каждый, даже среди физиков, знает, что лист графена состоит из двух вложенных друг в друга подрешеток. Атом водорода, оседая на графеновой поверхности, наводит локальный магнитный момент. Этот магнитный момент взаимодействует с соседними спинами в местах расположения других атомов водорода, упорядочиваясь ферромагнитно со спинами «своей» подрешетки графена и антиферромагнитно по отношению к спинам второй подрешетки (синие и оранжевые стрелки на рисунке). Перемещая с помощью зонда сканирующего туннельного микроскопа атом водорода между двумя соседними узлами решетки графена, ученые продемонстрировали возможность «включения» и «выключения» суммарного магнитного момента.

11 января 2016/ Новостной сайт Phys.org



22 апреля 2016/ IOP
Physicsworld.com

Конференции и школы
по магнетизму и магнитным материалам 2016 года,
на которые открыт прием заявок.

Даты проведения (дедлайн)	Название конференции	Место проведения	Контактная информация
4-9 сентября (14 мая)	26 European Physics Society: Condensed Matter Division (CMD 26): Workshop Multiferoics, Skyrmions and Electric Control of Magnetism	Гронинген, Нидерланды	http://cmd26.eu
12 октября (15 мая)	International Workshop on Oxide Electronics 23	Нанкин, КНР	http://woe23.com
25-27 июля (16 мая)	International Conference on Spintronics Materials, ANM2016	Университет Авейру, Португалия	www.anm2016.com
19-23 сентября (31 мая)	21st ETSF Workshop on Electronic Excitations	Лунд, Швеция	https://workshop.etsf.eu
1-4 сентября (15 июня)	International Conference on Highly Frustrated Magnetism (HFM 2016)	Тайпей, Тайвань	http://www.nsrcc.com/neutron/hfm2016
11-15 июля	Spin Caloritronics 7	Утрехт, Нидерланды	http://web.science.uu.nl/spin-caloritronics7



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>