



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

август 2016 г.

№3

**ПРИВЕТСТВУЕМ УЧАСТНИКОВ
МЕЖДУНАРОДНЫХ КОНФЕРЕНЦИЙ
EASTMAG-2016 и BICMM-2016!**



Настоящий номер приурочен к открытию VI Евразийского Симпозиума "Тенденции в магнетизме" EASTMAG 2016 и Байкальской международной конференции по магнитным материалам BICMM-2016. Номер содержит обзор, посвященный намечающемуся ренессансу ЦМД-тематики, а также традиционную подборку новостей магнетизма.

Euro-Asian Symposium "Trends in Magnetism" (EASTMAG), каждые три года собирает специалистов по магнетизму в одном из городов евразийского пространства России (география мест проведения конференции простирается от Казани до Владивостока). Очередной симпозиум состоится в Красноярске и начнет работу 15 августа.

Через три дня после окончания EASTMAG-2016 в поселке Листвянка на берегу Байкала начнет работу Baikal International Conference on Magnetic Materials BICMM-2016.

Желаем успешного проведения конференций и приятного завершения летнего отдыха!

МАГНИТИНФОРМ

24 мая на физическом факультете МГУ состоялась Конференция Магнитного Общества. Она собрала представителей Московского, Московского областного и Нижегородского отделений.



В своем вступительном слове Президент МАГО А.К. Звездин рассказал о деятельности Общества с 2000 года по настоящее время: при поддержке Общества проходили Московские Международные Симпозиумы по Магнетизму MISM, Международные Конференции по Постоянным Магнитам и др. мероприятия; секцией по постоянным магнитам разработан национальный стандарт по постоянным магнитам общепромышленного применения; с 2000 года издается Бюллетень МАГО.

А.К. Звездин предложил также освободить его от обязанностей Президента МАГО и выдвинул кандидатуру Николая Сергеевича Перова, д.ф.-м.н, профессора, зав. каф. магнетизма физического факультета МГУ. Собранием было принято решение удовлетворить просьбу А.К. Звездина, выразив ему благодарность за многолетний труд. Собранием был выбран обновленный состав правления, в который помимо действующих членов (проф. Звездин А.К., вице-президент МАГО акад. РАН А.С. Сигов, вице-президент МАГО проф. А.М. Тишин, директор МАГО

к.т.н. М.П. Шорыгин, глав. ред. Бюллетеня МАГО проф. РАН А.П. Пятаков, проф. М.И. Бичурин, к.ф.-м.н. К.А. Звездин, проф. А.С. Лилеев, к.ф.-м.н. А.А. Мухин, проф. В.К. Раев, к.т.н. В.А. Сеин, к.т.н. В.Д. Ходжаев) были введены д.ф.-м.н., проф. Н.С. Перов, к.т.н., ген. директор НПО «Магнитные материалы» С.В. Михайлин, и д.ф.-м.н., проф. Ю.К. Фетисов. Голосованием Н.С. Перов выбран новым Президентом МАГО.



А.К. Звездин
Президент МАГО
с 2000 по 2016.



Н.С. Перов
Президент МАГО
с 24 мая 2016 года.

Собрание продолжилось обсуждением текущего положения дел в российской индустрии постоянных магнитов и возможной роли Общества в деле воссоздания редкоземельной промышленности.

Н.С. Перов резюмировал итоги обсуждения, констатируя, что цели Общества сместились в сторону научных аспектов магнетизма и обозначил основные задачи на текущий момент:

- с целью получения среза общественного мнения о возможной роли МАГО в развитии магнетизма в нашей стране, предлагается провести онлайн-опрос и анкетирование российских ученых-специалистов по магнетизму в рамках ближайших конференций EASTMAG (15-19 августа, Красноярск) и VI Международной конференции "Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества", 3 - 7 октября 2016 года;

- Создать полнофункциональный сайт Общества, не ограниченный только информационной составляющей, с возможностями регистрации и функционалом социальной сети.

- Активизировать международное сотрудничество и связи с зарубежными общественными объединениями специалистов по магнетизму (Магнитное общество Тайваня, Кореи, европейские общества и др.).

- Активизация взаимодействия с магнитной индустрией как стратегическая и долгосрочная цель.

Следующую конференцию МАГО было решено провести в рамках конференции EASTMAG -2016.

АКТУАЛЬНО

Снова о магнитных пузырях

Когда-то цилиндрические магнитные домены (ЦМД) были излюбленным объектом исследований в микромагнетизме и служили в устройствах магнитной памяти (в девяностых годах на их основе даже велись разработки мобильных телефонов). Хотя расцвет этой тематики остался позади, в научной периодике еще можно встретить статьи практической направленности, посвященные ЦМД, например, недавняя работа про компьютерную память, использующую «кавалькаду» из ЦМД, в которой домены упорядоченным строем дрейфуют в переменном магнитном поле¹. В англоязычной литературе ЦМД получили название *magnetic bubbles*, т.е. магнитные пузыри, что связано с глубокой физической аналогией: так же как и пузыри в жидкости, ЦМД обладают поверхностной энергией и стремятся минимизировать ее.

Ренессанс ЦМД тематики оказался связан с обнаружением нового типа магнитных вихрей – скирмионов^{2,3} (рис.1). Их внешний вид, а также условия образования удивительно напоминают ЦМД (см., например, возникновение гексагональной решетки скирмионов в магнитном поле смещения на рис.1 с). Даже названия двух основных типов конфигураций скирмионов соответствуют доменным границам – Блоха и Нееля (рис. 1а,б).

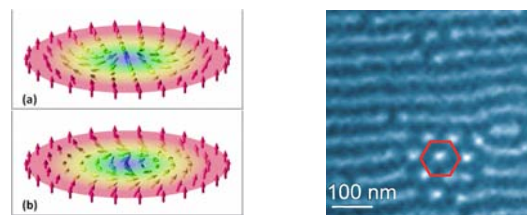


Рис.1. а) микромагнитная структура скирмиона неелевского типа; б) скирмион блоховского типа;

с) образование решетки скирмионов в полосовой структуре⁴ при магнитном поле смещения (изображение получено в лоренцевской просвечивающей электронной микроскопии).

Если сначала скирмионы были обнаружены как особая фаза магнитного упорядочения в виде гексагональной решетки⁵, то позже стали появляться сообщения о скирмионах как об индивидуальных объектах⁴, что позволило говорить о создании на их основе запоминающих устройств по образцу памяти на ЦМД⁶.

Рожденные из пены

Сразу после теоретического предсказания скирмионов и еще до появления первых экспериментальных свидетельств о существовании скирмионных фаз, в работе⁷ было предложено по-новому взглянуть на уже хорошо изученную проблему закритической динамики доменных границ.

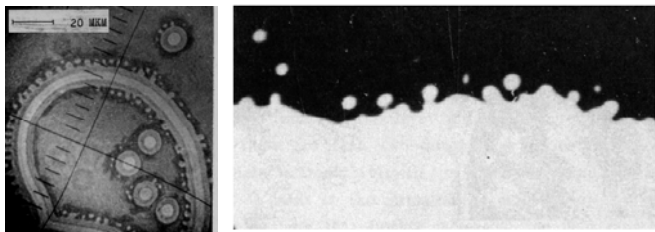


Рис.2. Рождение микродоменов перед движущейся магнитной доменной границей: а) динамическая магнитная конфигурация⁸; б) движение сегнетоэлектрической доменной границы⁹.

Еще в начале восьмидесятых годов было показано⁸, что при движении доменной границы в магнитном поле выше некоторого критического перед границей образуются изолированные магнитные возмущения. Граница словно «закипает», выбрасывая «пену и брызги» – зародыши новой фазы в домне, на который набегает граница (рис. 2а). Позже подобное явление наблюдалось и в динамике сегнетоэлектрических доменных границ (рис.2б) в электрическом поле⁹.

Так вот, согласно⁷, эти субмикронные зародыши, разрастающиеся в небольшие цилиндрические домены — не что иное, как магнитные скирмионы. Дополнительные слагаемые вида инварианта Скиме в модели распространения доменной границы позволяют описать образование перед границей этих магнитных возмущений. Опережая границу в ее движении, они обуславливают распространение границы фаз со скоростью превышающей предел Уокера.

Выдувание пузырей через трубочку

Однако настоящее использование скирмионов становится возможным только при управляемом их зарождении и перемещении. И здесь помогает «мыльная» аналогия: почему бы не выдувать скирмионы через трубку подобно пузырям? Это и было продемонстрировано в работе¹⁰. В качестве

трубки использовалось сужение в виде канала в магнитном материале, роль потока воздуха выполнял спин-поляризованный ток (рис. 3).

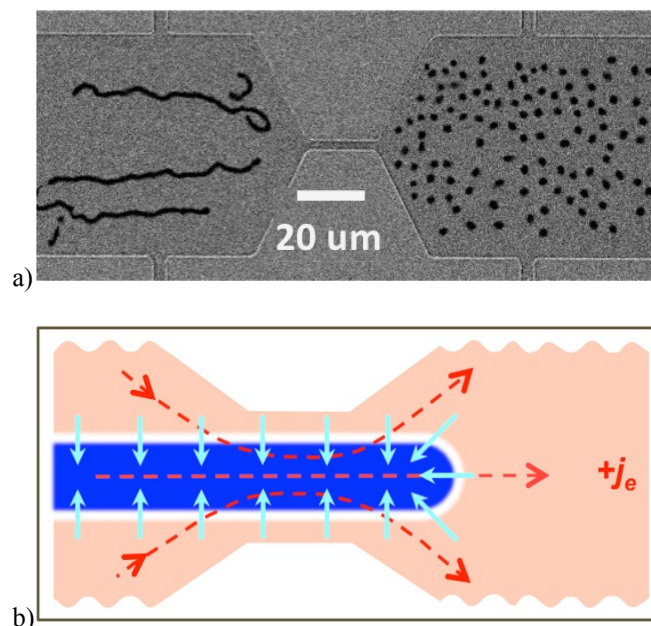


Рис. 3 Выдувание скирмионов: а) магнитооптическая фотография в отраженном свете нанометрового слоя сплава CoFeB с искусственным сужением, созданным методами фотолитографии. Слева – полосовые домены, справа – скирмионы, образовавшиеся после импульса тока продолжительностью 1 с. Поле смещения 0.5 мТл, плотность тока в импульсе 10^5 А/см². б) Механизм образования пузырьков: голубые стрелки показывают направления намагниченности в различных участках границы полосового домена (стенка неелевского типа). Красными штриховыми линиями показано направление тока.

Спин-поляризованный ток способен двигать неелевские доменные границы по току или против, в зависимости от их киральности – направления вращения намагниченности в границе. Внутри канала ток параллелен стенкам домена и не оказывает действие на них. Однако, вытекая из сужения на простор, ток приобретает боковую составляющую, которая начинает давить не только на оконечность (головку) домена, но и на боковые стенки.

Совместное действие силы со стороны тока, раздувающего головку домена, и сил поверхностного натяжения, стремящихся уменьшить поверхность и создать перемычку, приводят к отделению «пузырька»-скирмиона от полосового домена. Его сносит спиновым током, а на его месте вырастает следующий пузырь.

Надувание электрическим полем

Большие плотности токов, необходимые для зарождения и перемещения скирмионов, заставляют искать иные способы управления магнитными неоднородностями на локальном масштабе. В этой связи представляют интерес магнитоэлектрические эффекты воздействия электрического поля на микромагнитные структуры в пленках ферритов гранатов¹¹. Вследствие неоднородного магнитоэлектрического эффекта границы Нееля оказываются электрически поляризованными, причем знак поляризации зависит от киральности, что позволяет управлять ими с помощью электрического поля.

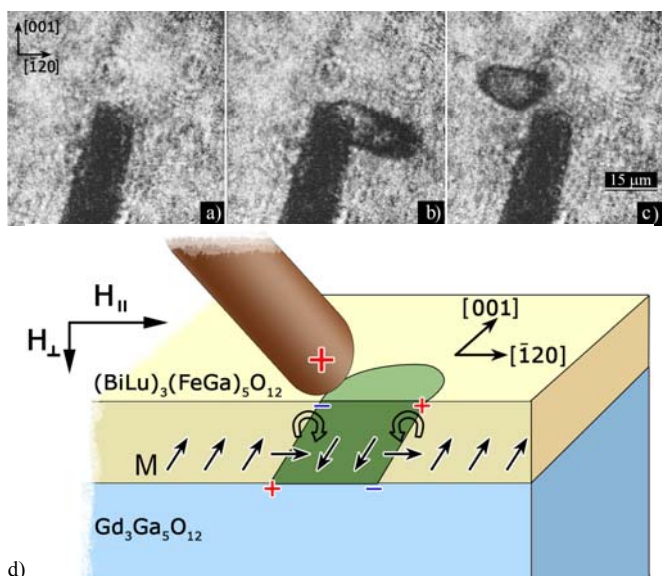


Рис. 4 Зарождение ЦМД электрическим зондом: а)-с) магнитооптические изображения 10-микронной пленки феррита граната в проходящем свете: а) начальное однодоменное состояние (темная область – изображение иглы-электрода), б) зарождение ЦМД при подаче напряжения больше 500 В, с) отделение ЦМД при снятии напряжения; д) механизм расширения ЦМД в электрическом поле. $H_{||}=200$ Э, $H_{\perp}=70$ Э, $T=300$ К.

В августовском номере *Писем в ЖЭТФ* вышла статья¹², в которой показано, что подача электрического напряжения на электрод-иглу приводит к зарождению, расширению и последующему отделению ЦМД от иглы (рис. 4 а-с). Механизм действия электрического поля на микромагнитные конфигурации феноменологически очень схож с действием спин-поляризованного тока, хотя имеет иную, магнитоэлектрическую, природу. Действительно, как показано на рисунке 4 д, электрическое поле действует по-разному на границы с противоположной киральностью,

электростатически притягивая одну и отталкивая другую, что приводит к раздуванию магнитного пузыря.

Независимо в совершенно иных системах – ультратонких слоях магнитных металлов толщиной всего в несколько атомов наблюдалось зарождение магнитных скирмионов под действием электрического поля¹³ от зонда сканирующего туннельного микроскопа (СТМ). На зонд подавалось напряжение в несколько вольт — деленное на атомарную толщину пленки это напряжение, тем не менее, дает напряженности полей 10 МВ/см, что на порядок превышает используемые в экспериментах с феррит гранатами. В отличие от экспериментов с надуванием электрическим током (рис. 3) скирмионы имели вид скорее бобов, чем горошин (рис.5), но топологически они были эквивалентны обычным круглым скирмионам. Подача на зонд сканирующего микроскопа напряжения противоположного знака приводило к стиранию скирмиона.

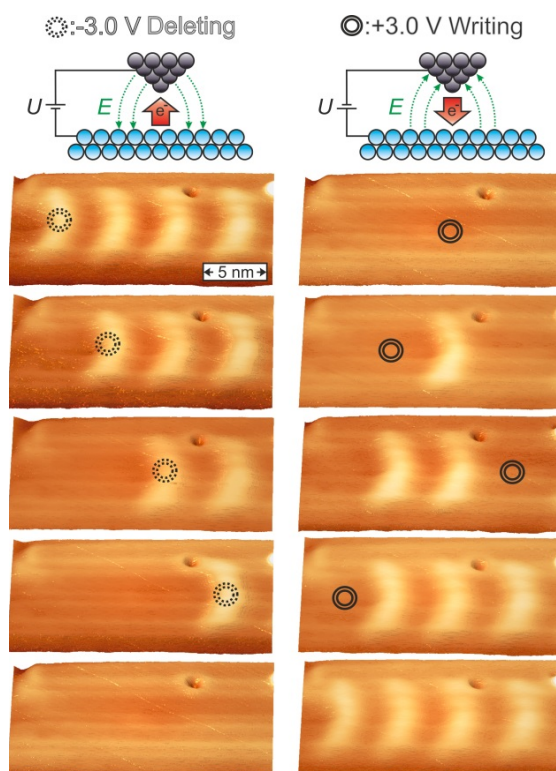


Рис. 5 Стирание и запись скирмионов в трехатомном слое железа с помощью зонда СТМ¹³. Приведена серия изображений в сканирующем зондовом микроскопе (проводящая мода). Левая колонка – предварительно записанные скирмионы уничтожаются подачей отрицательного напряжения на иглу. Правая колонка – запись скирмионов. Концентрические окружности показывают расположение зонда перед подачей напряжения. Поле смещения 2.5 Тесла. $T=7.8$ К.

Отметим, что ранее в этой же группе профессора Р. Визедангера наблюдалось зарождение и стирание скирмионов с помощью зонда СТМ под действием импульса спин-поляризованного тока¹⁴. Чтобы отличить чисто электростатическое воздействие от наблюдавшегося ранее эффекта передачи спина использовалась парамагнитная игла, не создававшая спиновую поляризацию при протекании через нее тока. Относительно механизма эффекта пока нет окончательной ясности: авторы¹³ склоняются к версии электроиндуцированного изменения обменного взаимодействия, но в то же время нельзя исключать и магнитоэлектрического сценария, как в случае зарождения ЦМД, показанном на рисунке 4.

В заключение, подчеркнем, все же, различия между ЦМД и скирмионами, чтобы не создавалось впечатление, будто оно сводится только лишь к нанометровым размерам последних. Причины образования ЦМД – конкуренция между магнитостатическими силами и поверхностной энергией доменных границ, в то время как в скирмионной фазе определяющую роль играет взаимодействие Дзялошинского-Мории. Последнее поддерживает спиновые структуры только с одним знаком киральности, так что скирмионы, в отличие от показанной на рисунке 4 б) микромагнитной структуры, имеют отличный от нуля топологический заряд и потому более устойчивы к коллапсу, чем ЦМД.

А.П. Пятаков

Литература

1. Moon, K.-W. *et al.* Magnetic bubblecade memory based on chiral domain walls. *Sci. Rep.* **5**, 9166 (2015).
2. Bogdanov A.N., Yablonskii, A. Thermodynamically stable ‘vortices’ in magnetically ordered crystals. The mixed state of magnets. **68**, 101–103 (1989).
3. Rössler, U. K., Bogdanov, a N. & Pfleiderer, C. Spontaneous skyrmion ground states in magnetic metals. *Nature* **442**, 797–801 (2006).
4. Yu, X. Z. *et al.* Real-space observation of a two-dimensional skyrmion crystal. *Nature* **465**, 901–4 (2010).
5. Mühlbauer, S. *et al.* Skyrmion lattice in a chiral magnet. *Science* **323**, 915–9 (2009).
6. Fert, A., Cros, V. & Sampaio, J. Skyrmions on the track. *Nat. Nanotechnol.* **8**, 152–6 (2013).
7. Dawber, M., Gruverman, a & Scott, J. F. Skyrmion model of nano-domain nucleation in ferroelectrics and ferromagnets. *J. Phys. Condens. Matter* **18**, L71–L79 (2006).
8. Ivanov, L. P., Logginov, A. S. & Nepokoichitskii, G. A. Experimental observation of a new mechanism of domain-wall motion in strong magnetic fields. *Sov. Phys. JETP* **57**, 583–592 (1983).
9. Shur, V. Y., Gruverman, A. L., Ponomarev, N. Y., Rumyantsev, E. L. & Tonkacheva N. A. Domain structure kinetics in ultrafast polarization switching in lead germanate. *JETP Lett.* **53**, 615 – 619 (1991).
10. Jiang, W. *et al.* Blowing magnetic skyrmion bubbles. *Science*. **349**, 283–286 (2015).
11. Пятаков, А. П. *et al.* Микромагнетизм и топологические дефекты в магнитоэлектрических средах. *УФН* **185**, 1077–1088 (2015).
12. Куликова, Д. П. *et al.* Зарождение цилиндрических магнитных доменов в пленках ферритов гранатов с помощью электрического зонда. *Письма в ЖЭТФ* **104**, 196–200 (2016).
13. Hsu, P. *et al.* Electric field driven switching of individual magnetic skyrmions. *arXiv*1601.02935
14. Romming, N. *et al.* Writing and Deleting Single Magnetic Skyrmions. *Science*. **341**, 636–639 (2013).

НОВОСТИ МИРОВОГО МАГНЕТИЗМА

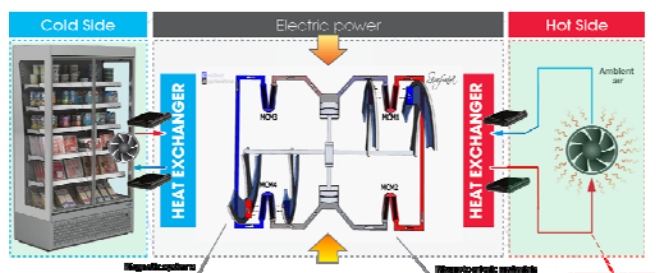
Магнитные холодильники выходят на рынок

Компания *Cooltech Applications* анонсировала выпуск первого коммерчески доступного холодильника, использующего систему магнитного охлаждения (magnetic refrigeration system, MRS).



Магнитокалорическая холодильная установка CoolTech App

Новый холодильник использует магнитокалорический эффект — наведенное магнитным полем изменение температуры при адиабатическом намагничивании или размагничивании вещества. Магнитокалорический материал циклически помещается и выносится из поля постоянного магнита, при этом тепло перекачивается системой водяного охлаждения от морозильной камеры в атмосферу.



Схематическое изображение цикла магнитокалорического охлаждения

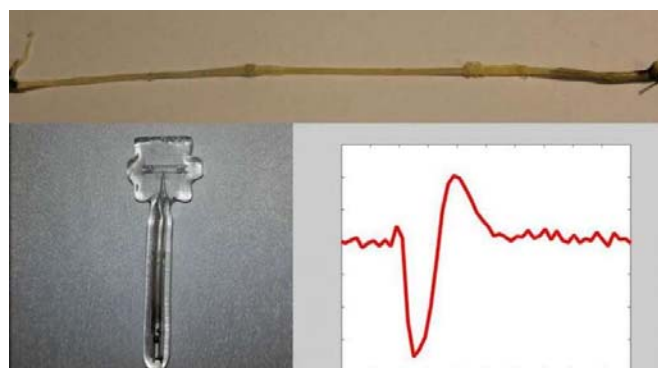
400-ватная холодильная установка MRS400 может похвастаться вдвое меньшим потреблением энергии, по сравнению с традиционными компрессорными аналогами. При этом удастся поддерживать в холодильной камере температуру от 2° С до 5° С — показатели для магнитокалорических машин ранее недостижимые.

15 июня 2016/ Новостной сайт Gizmag.com

gizmag

Оптический сенсор «животного магнетизма»

Речь не идет о мистических практиках Фридриха Месмера, а, скорее, о «животном электричестве» Луиджи Гальвани. Как известно, ученый заблуждался относительно источника электрического тока, но его опыты с лягушками заложили основы электрофизиологии. Одно из проявления электричества в живых организмах — распространение нервных импульсов по нервам.



Вверху: волокно седалищного нерва лягушки, по которому распространялся импульс; слева — датчик магнитного поля; справа — импульс магнитного поля.

Изменение электрического поля в нервных волокнах по законам электродинамики должно порождать, пускай и ничтожные, магнитные импульсы. Измерять их научились профессор Каспер Йенсен и другие ученые из института Нильса Бора с помощью оптических сенсоров магнитного поля, которые представляют более практичную и дешевую альтернативу сверхпроводящим СКВИД-магнетометрам. Магнитный сенсор состоит из небольшого (1 см в длину и 1 мм в поперечнике) стеклянного контейнера с парами цезия. Пропуская луч лазера вдоль оси контейнера, можно измерять ориентацию спина атомов цезия, на которую влияют даже очень слабые магнитные поля.

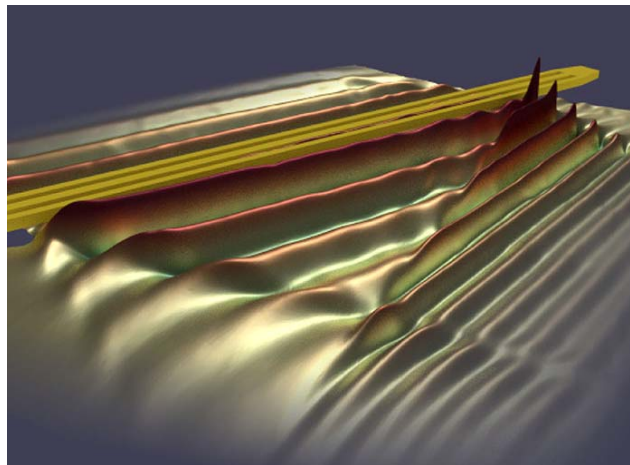
Редакция Бюллетеня хотела бы отметить, что существуют и твердотельные аналоги таких ультравосприимчивых сенсоров, например магнитооптические сенсоры на ферритах гранатах, разрабатываемые в Российском Квантовом Центре в группе В.И. Белотелова.

15 июля 2016/ Новостной сайт Phys.org

PHYS ORG

Спиновые волны тоже преломляются

Принцип корпускулярно-волнового дуализма распространяется и на магноны, так что ничто волновое им не чуждо, в том числе и преломление.



Преломление спиновых волн на границе между участками пленки пермаллоя с различной толщиной (желтая полоса – генератор спиновых волн).

Международной группе из университета Регенсбурга в Германии, университетов Нагойи, Осаки и Киото в Японии, а также университета Перуджи в Италии удалось с помощью керровской микроскопии высокого временного разрешения впервые визуализировать распространение спиновых волн.

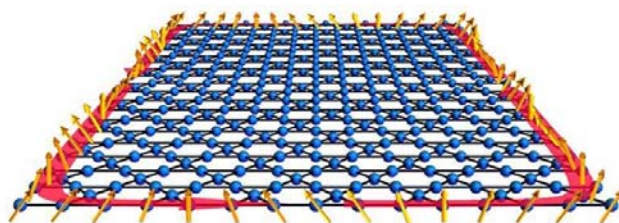
Волны преломлялись на линии раздела двух участков пленки с различной толщиной. При этом закон преломления отличался от привычного нам закона Снеллиуса. Так, при ориентации внешнего магнитного поля под углом к границе раздела угол преломления сначала возрастал при увеличении угла падения, а потом начинал уменьшаться. При преломлении не только уменьшается длина спиновой волны, но и увеличивается ее амплитуда (см. рис), так что каскад из ступенек может служить концентратором энергии в магнонных микросхемах.

J. Stigloher et al, Snell's Law for Spin Waves, *Phys. Rev. Lett.*, **117**, 037204 (2016)

21 июля 2016/ IOP
Physicsworld.com

Топологические изоляторы для магнонов

Эта тема перекликается с предыдущей, только магноны предстают в другой ипостаси — как частицы, и потому их свойства аналогичны свойствам электронов.



Двумерная кристаллическая решетка КагOME из атомов меди. Магнонные моды могут распространяться только вдоль ее края и только в одном направлении.

Термин «топологические изоляторы» был введен для сред, которые, оставаясь диэлектриками внутри, на поверхности обладали особыми, топологически защищенными, электронными состояниями. Благодаря им, на поверхности топологических изоляторов отсутствует запрещенная зона и поверхность становилась проводящей.

Аналогичное явление теперь обнаружено для магнонов в двумерных решетках КагOME — кристаллах, в которых атомы образуют узор из гексаграмм (шестиконечных звезд). В качестве материала используется металлоорганический комплекс из 1,3-бензенидикарбоксилата и атомов меди, которые и образуют решетку КагOME.

В такой структуре магноны могут распространяться вдоль края решетки, но не сквозь нее. Краевые моды киральные, т.е. магноны путешествуют вдоль края только в одном направлении.

Что интересно, такие волны не рассеиваются на дефектах и потому их можно использовать в магнонных устройствах для передачи спиновых возбуждений с минимальными потерями.

R. Chisnell et al. Topological Magnon Bands in a Kagome Lattice Ferromagnet, *Physical Review Letters* (2015)

13 июня 2016/ Новостной сайт Phys.org

PHYS.ORG

**Конференции и школы
по магнетизму и магнитным материалам 2016-2017 годов,
на которые открыт прием заявок.**

Даты проведения (дедлайн)	Название конференции	Место проведения	Контактная информация
7-11 сентября (31 июля)	International Conference on Highly Frustrated Magnetism (HFM 2016)	Тайпей, Тайвань	http://www.nsrcc.com/neutron/hfm2016
31 октября-4 ноября (1 августа)	Modern Development of Magnetic Resonance	Казань, Россия	http://kfti.knc.ru/mdmr/2016/index.php
15-18 ноября (31 августа)	1st European Conference on Molecular Spintronics (ECMols 2016)	Болонья, Италия	http://www.ecmols.eu
15-22 ноября (30 сентября)	XVII Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-17)	Екатеринбург, Россия	http://smu.imp.uran.ru/spfks
3-7 декабря (9 сентября)	2016 IEEE International Electron Devices Meeting (MRAM-session)	Сан-Франциско, США	bernard.dieny@cea.fr
12-16 декабря (15 сентября)	New Trends in Magnetic Structure Determination	Гренобль, Франция	https://indico.ill.fr/indico/event/53
3-6 сентября 2017 (17 февраля)	The 18 th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics	Шамони-Мон-Блан, Франция	http://isem2017.org
1-5 июля 2017 (1 апреля)	Moscow International Symposium on Magnetism (MISM 2017)	Москва, Россия	https://mism.magn.ru



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. Шорыгин, 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>