



Гл. редактор: А.П. Пятаков

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

ТОМ 15

июнь 2014 г.

№2

**ПРИВЕТСТВУЕМ УЧАСТНИКОВ
MISM-2014
И ПЕРВОЙ КОНФЕРЕНЦИИ ПО ФИЗИКЕ
ФЕРРОИКОВ!**



Настоящий номер приурочен к открытию Международного Симпозиума по Магнетизму MISM-2014 и конференции Novel Trends in Physics of Ferroics. Номер содержит обзор, посвященный кривым структуры в тонких магнитных пленках, а также традиционную подборку новостей магнетизма.

Moscow International Symposium on Magnetism (MISM-2014), начинающий свою работу 29 июня, на протяжении многих лет остается одним из самых представительных форумов по магнетизму, собирая участников со всего мира.

На следующий день после окончания MISM-2014 в Санкт-Петербурге в Физико-техническом институте имени Иоффе стартует Первая конференция по физике ферроиков First International Workshop "Novel Trends in Physics of Ferroics" 4 – 6 июля 2014.

Желаем успешного проведения конференций и приятного летнего отдыха!

Кто рассудит?



На текущем чемпионате мира по футболу в Бразилии случилось знаковое событие: впервые забитый мяч был засчитан с помощью электронной системы фиксации гола. Система регистрации GoalControl, одобренная ФИФА к использованию на чемпионате, состоит из 14 камер, расположенных по периметру поля, от которых не должно укрыться ничего из того, что происходит на поле. Однако, как водится, не обошлось без конфуза: после гола французов в ворота команды Гондураса на экране сначала появилась табличка "Гола нет", а потом, система, словно передумав, засчитала гол. Естественно, это вызвало массу пересудов. Если не перечислять конспирологических версий, то выдвигались гипотезы о «неправильном угле зрения» камеры, позже стали говорить о предшествующем голу эпизоде с попаданием мяча в штангу и качением вдоль линии ворот. Как бы то ни было, дополнительные системы регистрации, работающие на принципиально ином принципе, не помешали бы. В качестве таковых могли бы выступить уже испытанные на других футбольных соревнованиях системы Goalref и Cairros GLT, принцип действия которых основан на детектировании низкочастотного магнитного поля, создаваемого в створе ворот.

АКТУАЛЬНО**Киральные структуры
в магнитных пленках**

В последнее время интерес исследователей привлекают магнитные состояния, наблюдающиеся в тонких пленках магнитных материалов, такие как спиновые циклоиды [1], доменные структуры с однотипными доменными границами [2],[3] и скирмионы [4–7] (рис.1). Все вышеперечисленные объекты характеризуются определенной киральностью, т.е. заданным направлением разворота намагниченности.

Движение доменных границ под действием спин-поляризованного тока [3], высокая чувствительность скирмионов к переносу спинового момента [7], а также возможность передвижения доменных стенок с помощью электрического поля [8] делают эти топологически нетривиальные микромагнитные объекты перспективными для приложений в спинтронике. В симметричном плане они схожи с веерообразными молекулярными структурами, возникающими в жидких кристаллах под действием электрического поля (рис. 1), что является одним из проявлений флексоэлектрического эффекта (от лат. flexion - изгиб), т.е. возникновения электрической поляризации при изгибе [9].

В приведенном ниже обзоре мы рассмотрим причины образования киральных структур в пленках и способы управления ими. Также будут рассмотрены сходства и различия двух новых концепций в магнетизме – *спинового флексоэлектричества* [8] и *флексомагнетизма* [10].

Спиновое флексоэлектричество и флексомагнетизм

Хорошо известно, что атомы на поверхности кристалла находятся в иных условиях по сравнению с атомами в объеме, что проявляется в наличии эффективного электрического поля, направленного по нормали к границе кристалла. Сходного эффекта можно добиться, изогнув кристаллическую решетку: вышележащие растянутые слои находятся в ином состоянии

по сравнению с нижележащими, таким образом, центральная симметрия изначальной кристаллической решетки нарушается во всем объеме кристалла, и он становится электрически поляризованным (рис. 1а). Этот эффект, называемый флексоэлектрическим, имеет место также и в жидких кристаллах в виде изгибной деформации директора (вектора, задающего ориентацию молекул) связанной с электрической поляризацией (рис. 1 б). Аналогичное явление в магнитных средах – спиновое флексоэлектричество – представляет собой взаимосвязь электрической поляризации и «изгиба» в распределении намагниченности (Рис.1 в) [8]. Такую веерообразную структуру, в которой намагниченность вращается в плоскости, содержащей направление модуляции, с периодом, значительно превышающим постоянную решетки, называют спиновой циклоидой. В этой связи спиновые циклоиды, наблюдаемые в магнитных монослоях [1], обусловлены электрическими полями на границе кристалла. Они также могут приводить к образованию других типов пространственно-модулированных структур: доменных границ неелевского типа (рис.1 г) и скирмионов – локализованных осесимметричных структур (рис. 1 д). Скирмионы стали чрезвычайно популярным объектом исследования в последнее время [5–7], хотя структуру, подобную изображенной на рисунке 1 д, можно найти еще в обзоре 1990 года [4], посвященном магнитным солитонам.

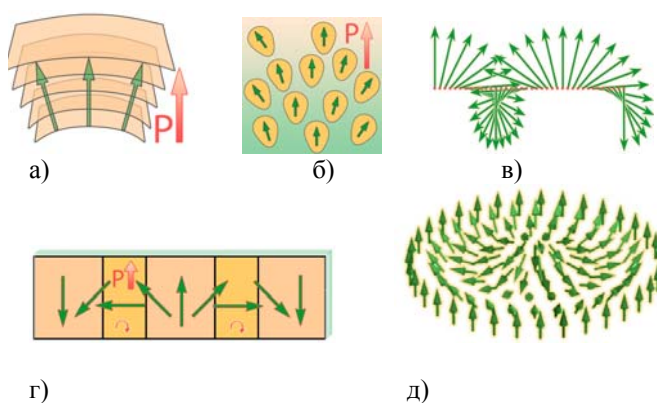


Рис. 1 Симметричная аналогия: а) флексоэлектрический эффект в твердых телах б) молекулярные структуры в жидких кристаллах в) спиновые циклоиды г) гомокиральные доменные границы Нееля (размеры границ непропорционально увеличены по отношению к доменам в целях наглядности аналогии с циклоидой) д) скирмион.

Все структуры, показанные на рисунке, характеризуются определенным направлением разворота намагниченности, задаваемым векторным произведением соседних спинов $[\mathbf{s}_1 \times \mathbf{s}_2]$. Его называют киральностью, точнее *векторной киральностью* – термин неудачный, поскольку его часто путают с киральностью в общепринятом смысле, характеризующей магнитные вихри. Векторному произведению спинов, как известно, пропорционален также гамильтониан антисимметричного обмена Дзялошинского-Мории, который и является микромеханизмом образования киральных магнитных структур.

Другой источник путаницы – термин, введенный Риккардо Хертелем [10] для обозначения широкого класса явлений, наблюдаемых в изогнутых пленках магнитных материалов – *флексомagnetизм*.

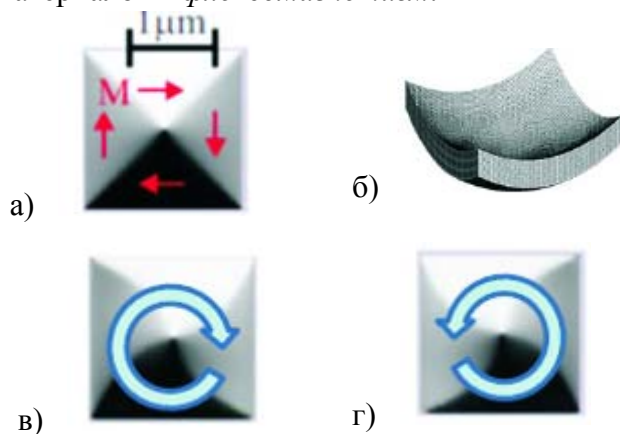


Рис. 2. Флексомagnetизм а) исходная доменная структура с замкнутым распределением намагниченности б) изгиб магнитной мембраны в) скручивание доменной структуры при изгибе г) скручивание на выпуклой мембране [10].

Флексомagnetизм, в отличие от спинового флексоэлектричества, определяется не электрическими, а «магнитными» зарядами, связанными с ненулевой дивергенцией намагниченности в изогнутой пленке. Так, в работе [10] было показано, что наблюдаемое в экспериментах закручивание доменной структуры, показанной на рисунке 2, по часовой (рис. 2 в) или против часовой стрелки (рис. 2 г) может быть воспроизведено численным моделированием распределения намагниченности в изогнутых пленках, при этом физическая модель включает только стандартные для микромагнетизма взаимодействия:

(гейзенберговский) обмен, магнитное диполь-дипольное взаимодействие и анизотропию.

Несмотря на различие в физических механизмах, у спинового флексоэлектричества и флексомагнетизма есть симметричная общность: и в том и другом случае нарушение центральной симметрии вследствие изгиба (будь то реальный изгиб поверхности или заменяющее его веерообразное распределение намагниченности) приводит к киральным эффектам, о которых пойдет речь ниже.

Киральность и движение доменных границ

Хотя первыми из обнаруженных киральных спиновых структур в пленках были спиновые циклоиды, наблюдавшиеся в монослоях Mn [1], для пленок более характерна полосовая или лабиринтная доменная структура, в которой пространственная модуляция намагниченности имеет место только в доменных границах, разделяющие однородно намагниченные области – домены. Благодаря своей подвижности доменные стенки оказываются весьма чувствительными к внешним воздействиям – не только к магнитному полю, но и к спин-поляризованному току и электрическому полю.

Киральность играет здесь важную роль, поскольку от нее зависит не только скорость движения доменных границ в магнитном поле (как это имеет место в нанотрубках из пермаллоя вследствие флексомагнетизма [10]) но и само направление движения.

Аналогом спиновой циклоиды в случае полосовой доменной структуры является последовательность гомокиральных (с одинаковым направлением вращения намагниченности) доменных границ, причем границ именно неелевского типа, в которых плоскость разворота содержит нормаль к доменной стенке (рис. 1 г). Спиновое флексоэлектричество проявляется в данном случае в виде электрической поляризации доменных границ, создающей поверхностные заряды, позволяющие управлять движением доменной границы с помощью электрического поля от электрода в виде острия (Рис.3а). Как показали эксперименты в пленках ферритов гранатов [11], электроиндуцированное движение доменных границ, действительно,

зависит от киральности: доменная граница притягивается к игле, либо отталкивается от нее, в зависимости от направления разворота намагниченности в ней (Рис.3 б). Поскольку направление намагниченности в центре доменной границы стремится ориентироваться вдоль внешнего магнитного поля, киральность доменной границы можно переключать, меняя направление поля на противоположное (Рис.3 б) [11]. Соседние доменные границы при этом обладают противоположной киральностью и ведут себя по-разному (если одна притягивается к игле, то другая отталкивается от нее, рис. 3б.).

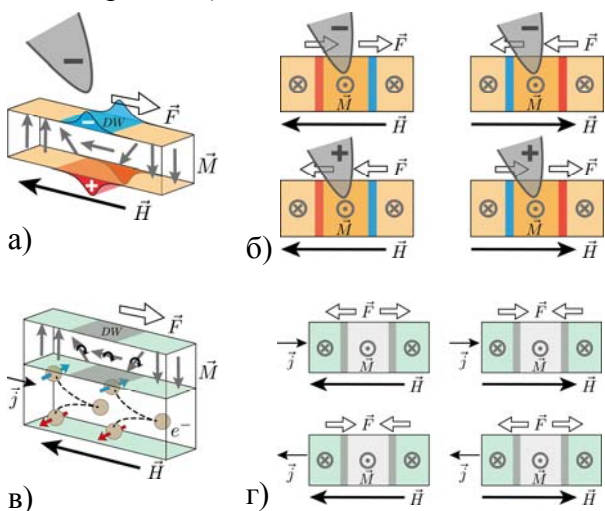


Рис. 3. Движение доменных границ, зависящее от киральности, которая задается направлением магнитного поля $\vec{H}$: а) поверхностные электрические заряды в доменной границе б) вид сверху на доменную структуру: сила, действующая на доменную стенку, зависит от заряда иглы и киральности стенки [11]. в) спиновый эффект Холла в многослойных структурах: спиновый ток, инжектируемый из нижнего слоя, воздействует на доменную границу силой $\vec{F}$ г) вид сверху: как и в случае рисунка 3б соседние границы имеют противоположные киральности [12].

Как недавно обнаружено в экспериментах по передвижению доменных стенок спин-поляризованным током, киральность определяет направление движения доменных границ и в этом случае [3],[12]. Спиновый ток, поступающий из нижнего немагнитного слоя тяжелого металла (Pt, Ta, Ir) при разделении электронов по спину за счет спинового эффекта Холла (Рис. 3 в), приводит в движение доменные границы [13]. Поскольку во внешнем магнитном поле киральность соседних доменных границ противоположна, каждая вторая стенка движется против потока электронов (Рис. 3 г).

Это парадоксальное поведение доменных границ ставило в тупик исследователей, пока они не стали учитывать их киральность [3].

Стоит отметить, что скирмион на рис. 1 д) может рассматриваться как доменная граница Нееля, скрученная в кольцо, а это означает, что им тоже можно управлять электрическим полем.

Коль скоро киральность играет такую большую роль, надо уметь управлять ею, или хотя бы ее предсказывать. В настоящее время для получения структур с заданной киральностью используют два способа. Первый заключается в использовании взаимодействия Дзялошинского-Мории, стабилизирующем структуры с одной киральностью. Такие структуры наблюдаются как в проводящих, так и в диэлектрических пленках: в двойном атомном слое железа на подложке из вольфрама [2], в многослойных наноструктурах тяжелый металл/ферромагнетик/оксид [3], в эпитаксиальных пленках ферритов гранатов толщиной в 10 мкм, выращенных на подложке из гадолиний-галлиевого граната [11]. Во всех случаях направление вращения намагниченности в доменных границах задается выбором материалов. Более гибкий подход состоит в использовании внешнего магнитного поля, как уже было описано выше (рис. 3). Первоначально он использовался в магнитоэлектрических [11], а затем спин-токовых экспериментах [12]. В этом случае киральность доменных границ меняется на противоположную от границе к границе, что проявляется в различном поведении соседних доменных границ под внешним воздействием в виде электрического поля или спин-поляризованного тока (Рис. 3б, г). Исходя из аналогии с флексомагнетизмом, можно предложить еще один способ задания определенной киральности – механическое воздействие на пленку (рис.2). Направление ее изгиба будет задавать направление вращения намагниченности в доменных границах. Учитывая, что микроэлектроника выходит в третье измерение, такой подход может оказаться перспективным.

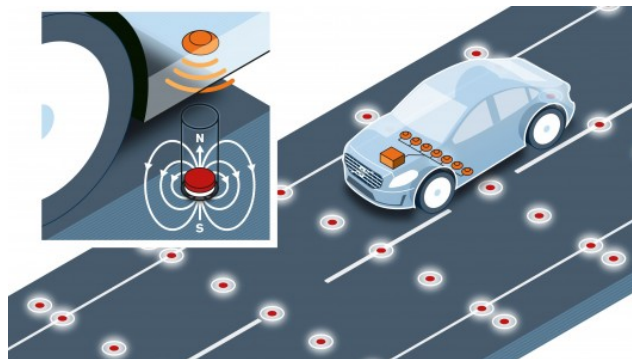
Во всех рассмотренных случаях явно или неявно присутствует идея кривизны – так геометрия подсказывает новые сюжеты физике.

Литература

- [1] Bode M, Heide M, Von Bergmann K, et al Chiral magnetic order at surfaces driven by inversion asymmetry. *Nature* **447** 190–3 (2007)
- [2] Heide M, Bihlmayer G and Blügel S Dzyaloshinskii-Moriya interaction accounting for the orientation of magnetic domains in ultrathin films: Fe/W(110) *Physical Review B* **78** 140403 (2008)
- [3] Emori S, Bauer U, Ahn S et al Current-driven dynamics of chiral ferromagnetic domain walls *Nature materials* **12** 611–6 (2013)
- [4] Kosevich A M, Ivanov B A and Kovalev A S Magnetic Solitons *Physics Reports* **194** 117–238 (1990)
- [5] Rössler U K, Bogdanov a N and Pfeleiderer C Spontaneous skyrmion ground states in magnetic metals. *Nature* **442** 797–801 (2006)
- [6] Heinze S, Von Bergmann K, Menzel M et al Spontaneous atomic-scale magnetic skyrmion lattice in two dimensions *Nature Physics* **7** 713–8 (2011)
- [7] Fert A, Cros V and Sampaio J Skyrmions on the track. *Nature nanotechnology* **8** 152–6 (2013)
- [8] Pyatakov A P, Meshkov G A and Zvezdin A K Electric polarization of magnetic textures: New horizons of micromagnetism *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **324** 3551–4 (2012)
- [9] Pyatakov A P and Zvezdin A K Flexomagnetoelectric interaction in multiferroics *The European Physical Journal B* **71** 419–27 (2009)
- [10] Hertel R Curvature-Induced Magnetochirality *Spin* **03** 1340009 (2013)
- [11] Pyatakov A P, Sechin D A, Sergeev A S et al Magnetically switched electric polarity of domain walls in iron garnet films *EPL (Europhysics Letters)* **93** 17001 (2011)
- [12] Haazen P P J, Murè E, Franken J H Domain wall depinning governed by the spin Hall effect. *Nature materials* **12** 299–303 (2013)
- [13] Liu L, Lee O J, Gudmundsen T J, Ralph D C and Buhrman R A Current-Induced Switching of Perpendicularly Magnetized Magnetic Layers Using Spin Torque from the Spin Hall Effect *Phys. Rev. Lett.* **109** 96602 (2012)

ЗАРУБЕЖНЫЕ ЖУРНАЛЫ И САЙТЫ

Магнитная разметка для самоуправляемых автомобилей



Автомобиль, как известно, означает самодвижущееся транспортное средство. Тем не менее, управление автомобилем до сих пор остается за человеком, а такси-автоматы встречаются пока только на страницах фантастических рассказов.

Основная техническая проблема, которую надо решить для создания таких транспортных средств – позиционирование автомобиля на проезжей части с точностью до десятка сантиметров, чтобы он следовал выбранной полосе движения. Системы спутниковой навигации эту проблему решить не смогут, и дело здесь даже не в точности позиционирования, а в невозможности их использования в туннелях. Видеокамеры также не помогут, так как их работа зависит от погодных условий. Поэтому оптимальным решением на данный момент считается размещение большого числа магнитов – меток внутри дорожного полотна.

В шведском Гётеборге к 2017 году автоконцерн Вольво планирует запустить 100 таких машин, курсирующих по улицам города. Сейчас данная система проходит тестирование на испытательном треке длиной 100 метров. Магниты размером 40×15 мм помещаются на глубину 20 см, создавая невидимую глазом дорожку, которую чувствуют магнитные сенсоры автомобиля.

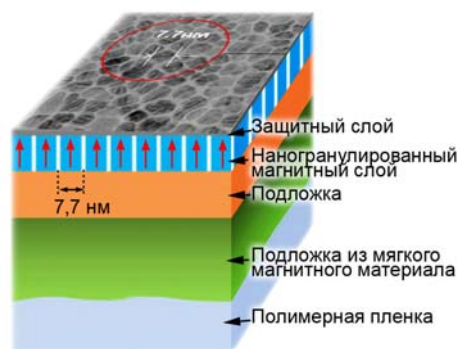
11 марта 2014/ Новостной сайт [Gizmag](http://gizmag.com)
New and Emerging Technology News

gizmag

Старые добрые ленты устанавливают новые рекорды

Корпорация Sony объявило о создании магнитного покрытия для магнитных лент с рекордной плотностью записи информации для пленочного типа носителей – 148 Гб/дюйм, позволяя записать внушительные 185 терабайт на одну кассету.

У читателя может возникнуть вопрос, кому нужны такие достижения, если эра кассетных магнитофонов и других устройств давно закончилось? Однако пленочная технология в расчете на бит информации остается очень дешевой, и она может служить там, где требуется хранить большие объемы информации, а время доступа не столь важно – в крупных библиотеках. Кроме того, разработанные подходы могут пригодиться и для других устройств.

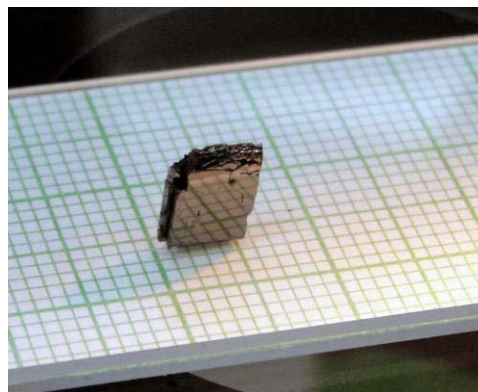


Sony разработала новую вакуумную технологию нанесения тонких пленок, позволяющую получать слой из «калиброванных» магнитных наночастиц. До сих пор не удавалось получить слой из наночастиц заданной формы, размеров и ориентации, что препятствовало записи информации с высокой плотностью. Путем улучшения поверхностей подложки и нижележащего магнитомягкого слоя, а также подбором условий вакуумного напыления Sony удалось получить частицы размером 7,7 нм, сведя к минимуму разброс в размерах и ориентации нанокристаллитов. Такие размеры бита информации позволяют достичь заявленной плотности информации, в 74 раза превышающей плотность используемых в настоящее время для записи информации магнитных лент.

30 апреля 2014/ www.sony.net
Sony Corporation. News releases

Обойдемся без редкой земли?

Редкоземельные элементы являются неременным ингредиентом в современных рецептах приготовления постоянных магнитов. Они обеспечивают высокую коэрцитивную силу магнитного материала. Учитывая резкое повышение цен на редкоземельные материалы и экологические риски, связанные с их добычей, актуальным является создание сильных постоянных магнитов без редкой земли.



Монокристалл нитрида железа-лития / Ames Lab

Ученые из лаборатории Эймса разработали технологию роста монокристаллов железо-замещенного нитрида лития. Полученный материал удерживал намагниченность в поле 11 Тесла, что на порядок превышает коэрцитивную силу коммерчески доступных магнитов.

Как полагают исследователи, в этих магнитах атомы железа берут на себя не свойственную им роль редкоземельных атомов, увеличивая магнитную анизотропию материала: так получается при расположении атома железа между двумя атомами азота.

Это было бы настоящим прорывом в индустрии, если бы не одно существенное обстоятельство: криогенные температуры при которых наблюдаются эти магнитные свойства. Однако данное соединение станет модельной системой для теоретических исследований необычного поведения ионов железа, которые, можно надеяться, укажут пути создания практически значимых материалов.

28 апреля 2014/ Новостной сайт Phys.org

PHYS.ORG

Снова о магнитном моменте протона

Германским ученым из института Макса Планка удалось измерить магнитный момент протона с точностью до 10^{-7} процента.

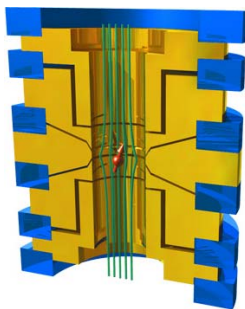
У критически настроенного читателя возникает резонный вопрос о мотивации такого рода исследований, кто-то, возможно, вспомнит юмористическую передачу о спорте «Назло рекордам!?».

Однако проблема точного определения магнитного момента протона намного глубже и, можно сказать, «экзистенциальная», так как напрямую связана с самим нашим существованием. Даже малейшее отличие магнитного момента протона от антипротона нарушает фундаментальный принцип СРТ – инвариантности (относительно симметричного преобразования с одновременной инверсией заряда, пространства и времени), что может пролить свет на наблюдаемую во Вселенной асимметрию вещества и антивещества, которой мы обязаны своим существованием.

Для измерений исследователи использовали цилиндрическую камеру, называемую ловушкой Пеннинга, позволяющую удерживать одиночную заряженную частицу или античастицу с помощью однородного магнитного и неоднородного электрического полей. Протон движется по круговой орбите вокруг оси цилиндра с циклотронной частотой, а его спин прецессирует с другой частотой. Отношение частот позволяет определить магнитный момент. Основная проблема состоит в точном измерении частоты прецессии, для чего ученым пришлось задействовать дополнительное магнитное поле и две ловушки Пеннинга. Проведя тысячи экспериментов, ученые установили значение магнитного момента с точностью, в 760 раз превышающей предыдущий результат 2012 года.

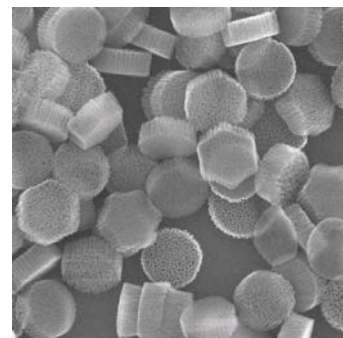
Однако это еще половина работы – ведь такие же эксперименты нужно провести с антипротоном, поэтому ловушку Пеннинга уже установили в ЦЕРН для измерений, которые начнутся этим летом.

2 июня 2014/ IOP
Physicsworld.com



Наноконструкты для медицины

Американо-итальянская группа исследователей создала новый вид композитных частиц для лечения злокачественных опухолей местным нагревом (локальной гипертермией) и направленной доставкой лекарств (drug delivery). «Наноконструкты», как их назвали исследователи, представляют собой



два типа структур – мезопористые кремниевые и дисковидные полимерные субмикронные частицы, внутри которых находятся наночастицы оксида железа. Эти наноконструкты способны аккумулироваться в переродившихся тканях, а по выполнении своей функции – выводиться из организма.

В медицине уже давно используются наночастицы оксидов железа в качестве контраста при магниторезонансной томографии, а также в локальной гипертермии. Однако существует некоторое противоречие: для лучшей аккумуляции частиц под действием магнитного поля нужны относительно крупные частицы с большим магнитным моментом, а для эффективного разогрева нужны частицы меньше 10 нм, находящиеся в суперпарамагнитном состоянии с бесконечно малой коэрцитивной силой и отсутствующей остаточной намагниченностью.

Ученые задались целью сделать универсальные частицы, объединяющие в себе достоинства больших и малых наночастиц. В наноконструктах мелкие наночастицы размером 5 нм с одной стороны вели себя как суперпарамагнитные, а с другой – демонстрировали коллективное поведение, что позволяло более эффективно управлять ими с помощью магнитного поля, а также приводило к десятикратному увеличению контраста изображений в МРТ.

16 июня 2014/ Новостной сайт Phys.org

PHYS ORG

Конференции и школы
по магнетизму и магнитным материалам 2014 года,
на которые открыт прием заявок.

Даты проведения (дедлайн)	Название конференции	Место проведения	Контактная информация
19 – 23 августа (30 июня)	<i>VI Байкальская международная конференция "Магнитные материалы. Новые технологии", BICMM-2014</i>	Иркутская область, пос. Большое Голоустное (берег Байкала)	http://www.bicmm.isu.ru Секр. орг комитета: Семенов Андрей Леонидович +79148760014
28 – 31 октября (30 июня)	<i>3rd International Conference of Asian Union of Magnetism Societies (ICAUMS)</i>	Китай, г. Хайнань, Международный выставочный центр	http://www.icaums2014.org
10 – 16 августа (1 июля)	<i>IEEE Magnetism Society Summer School</i>	Бразилия, Рио-де-Жанейро	http://ieemagnetism.org
17 – 19 сентября (7 июля)	<i>Summer school "Magnetism on a Molecular Scale: Experiment and Theory"</i>	Германия, Гамбург	http://www.sfb668.de/aktuelles/veranstaltungen/summer_school_2014
27 – 29 октября (25 июля)	<i>14th Non-Volatile Memory Technology Symposium (NVMTS 2014)</i>	Южная Корея, о. Чеджу, Гранд Отель Чеджу	http://www.nvmts2014.org
16 – 18 сентября (1 августа)	<i>Marie Curie school on spintronics Theory, devices and applications</i>	Франция, г. Париж, Réfectoire des Cordeliers	http://www.itn-wall.eu
24 – 29 августа (1 августа)	<i>Charge and Spin Transport in Non-Metallic Systems and Confined Geometries (Summer School)</i>	Германия, г. Майнц	http://www.mainz.uni-mainz.de/organictransport.php



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/bulleten>