

Наноразмерные элементы и гетероструктуры для фотоники и спинтроники: теория, математическое моделирование, реализация в эксперименте

А.К. Звездин, В.И. Белотелов*, К.А. Звездин, Д.И. Плохов, А.П. Пятаков*,
А.В. Хвальковский

Теоретический отдел ИОФ РАН

**Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова*

Данный цикл работ посвящен одному из наиболее актуальных направлений современной физики твердого тела – изучению наноразмерных элементов и гетероструктур для фотоники и спинтроники. В рамках данной тематики авторами рассмотрены наиболее важные аспекты указанного направления, связанные, прежде всего с теоретическими исследованиями магнитооптических свойств различных наноструктурированных материалов, таких как многослойные пленки, двумерные и трехмерные магнитные фотонные кристаллы, магнитоэлектрических материалов и мультиферроиков. Изучены также магнитные и транспортные свойства наноконтактов, содержащих доменную стенку, решен ряд фундаментальных проблем квантовой теории мезоскопических магнитов. Заложены основы для математического моделирования при изучении указанных систем. Все полученные результаты являются оригинальными, имеющими большую практическую значимость для создания новых современных устройств оптики и магнитной наноэлектроники (спинтроники), а также для приложений в материаловедении. Ниже приводятся основные полученные результаты по отдельным аспектам проведенных исследований.

Замедление света и экстраординарные магнитооптические эффекты в плазмонных структурах и фотонных кристаллах

Данный цикл работ посвящен исследованию оптических и МО свойств различных магнитных наноструктурированных материалов. При этом, наряду с одномерными магнитными фотонными кристаллами (МФК), рассмотрены также двумерные и трехмерные МФК, и, кроме того, предложены новые наноструктурированные материалы – метал-диэлектрические пленки.

В работе проведено общее теоретическое рассмотрение магнитооптических (МО) свойств МФК, которое справедливо не только для многослойных пленок, но и для двумерных (система отверстий в магнитной матрице) и трехмерных (система диэлектрических сфер, пространство между которыми заполнено магнитной жидкостью) МФК [1-5]. В частности, показано, что удельный угол Фарадея обратно пропорционален групповой скорости излучения и резко возрастает при приближении групповой скорости к нулю, т.е. при осуществлении условий замедления света в структуре.

Дальнейшие исследования магнитных наноструктурированных систем показали, что МО эффекты могут быть усилены не только в МФК, но в ряде других систем. Автором данной работы была предложена двухслойная метало-диэлектрическая пленка, в которой слой металла был периодически перфорирован системой субволновых отверстий [6-9]. Проведенный аналитический анализ и численный эксперимент показали, что предложенная структура также очень интересна в отношении усиления МО эффектов. Кроме того, удалось получить высокое оптическое прохождение, на частотах резонансного усиления эффекта Фарадея. Последнее обстоятельство крайне важно для возможных применений метало-диэлектрических перфорированных пленок, поскольку позволяет существенно уменьшить оптические потери.

Третья часть работ была посвящена оптимизации изученных структур в отношении их возможных применений для создания новых оптических элементов. При этом использована, созданная автором компьютерная программа, позволяющая осуществлять численное моделирование различных магнитооптических систем. Подробно исследован случай одномерных МФК [10-11], а также найдены оптимальные геометрические и физические параметры перфорированных магнитных пленок. На основании полученных результатов автором работы предложены схемы ряда новых элементов оптики – оптический изолятор, магнитооптическая призма, сенсор магнитного поля. Все указанные устройства являются перестраиваемыми во внешнем магнитном поле.

Магнетизм мезоскопических магнитов – новые квантовые эффекты

На протяжении последних лет проведены успешные исследования ряда актуальных проблем магнетизма молекулярных магнитов и нанокompозитных магнитных материалов на их основе. Решены фундаментальные проблемы квантовой теории мезоскопических магнитов: была исследована нелинейная динамика квазиклассического спина в изменяющемся с постоянной скоростью магнитном поле [12]. Эти работы позволяют оценить возможности применения магнитных молекул в квантовых вычислениях, одной из наиболее выдающейся современных проблем физики и техники [13]. Вообще, поведение молекулярных магнитов в изменяющемся с постоянной скоростью магнитном поле не является очевидным вопросом, показано, что неравновесный процесс намагничивания в изменяющемся с постоянной скоростью магнитном поле приводит к гистерезису даже в парамагнитной системе, проблема требует глубокого фундаментального изучения.

Были выполнены эксперименты над этими системами в сильных магнитных полях. Полученные экспериментальные результаты были проанализированы и сопоставлены с теоретическими. Изучен ряд интересных особенностей, свойственных мезоскопическим объектам, и кинетика процесса [14]. В частности, полный процесс намагничивания и некоторые интересные проявления мезоскопической природы наномагнитов Mn_4 , Mn_{12} , V_{15} , Mn_6R_6 исследованы как теоретически, так и экспериментально [15]. Методика использования сильного магнитного поля зарекомендовала себя в качестве многообещающего способа изучения молекулярных магнитов. В частности, она позволяет дать ответ на ключевой вопрос физики мезоскопических магнитных объектов о взаимодействии между ионами, входящих в состав молекулярных магнитов, и решить проблему создания новых молекул с требуемыми свойствами.

Магнитоэлектрические взаимодействия, перекрестные эффекты, и несоизмеримые структуры в новых материалах спинтроники

В последние годы наблюдается небывалый всплеск интереса к магнитоэлектрическим материалам и мультиферроикам [16]. Первые характеризуются линейным магнитоэлектрическим эффектом (наведенным электрическим полем намагниченностью и индуцированной магнитным полем электрической поляризацией), вторые обладают спонтанными электрической поляризацией и намагниченностью, которыми можно управлять «перекрестным» образом: вызывать переключения намагниченности электрическим полем и наоборот – электрической поляризации магнитным полем.

Таким образом, магнитоэлектрические материалы предоставляют новые возможности преобразования электричества в магнетизм и обратно. Решение первой проблемы известно со времен Ганса Христиана Эрстеда, открывшего магнитное действие тока, а обратная задача преобразования постоянного магнитного поля в электрическое напряжение была решена позже Эдвином Холлом в том же XIX веке. Что же нового ждут от магнитоэлектриков, какими преимуществами обладают технические решения, основанные на них?

В настоящее время для детектирования магнитного поля используются датчики Холла и элементы на гигантском магнитосопротивлении. Принцип действия этих устройств предполагает протекание электрического тока, что приводит к омическим потерям. Кроме того, при современных скоростях считывания информации в жестких дисках значительную проблему представляют потери на вихревые токи, возникающие в проводящих частях элементов. Задача генерации магнитного поля в устройствах магнитной памяти вызывает еще большие трудности. Дальнейшее увеличение плотности записи информации требует создания все более сильных полей в малых объемах. Применяющиеся в настоящее время индуктивные элементы уже не удовлетворяют этим возрастающим требованиям: генерация сильных магнитных полей требует увеличения токов в катушках записи, что влечет за собой увеличение омических потерь, разогрев и перегорание элементов. Кроме того, магнитные катушки страдают от вихревых токов и сложны в изготовлении.

Мультиферроики и магнитоэлектрики как материалы для магнитоэлектрических преобразователей могут стать естественным решением проблемы [17]. Преобразование магнитного поля в электрическое напряжение с помощью магнитоэлектриков не требует протекания электрических токов, что снижает омические потери; диэлектрические свойства мультиферроиков избавляют также от потерь, связанных с вихревыми токами. Емкостные элементы на основе магнитоэлектриков лучше совместимы с планарной технологией, требованиями миниатюризации и необходимостью создания больших напряженностей магнитного поля. Особенно привлекательны магнитоэлектрические материалы как единая платформа, на основе которой будут создаваться интегральные схемы спиновой электроники: подобно тому, как в традиционной электронике вся элементная база реализуется на основе гетероструктур в одном кристалле кремния, так и преобразование информации, хранящейся в форме намагниченности, в электрические сигналы и обратно, может быть реализовано на основе гетероструктур из магнитоэлектриков и весьма сходных с ними по кристаллическому строению магнитных полуметаллов.

Очерченная выше сфера практических приложений предъявляет довольно жесткие требования к магнитоэлектрическим материалам. Они должны обладать магнитоэлектрическими свойствами при температуре выше комнатной, сами значения магнитоэлектрического эффекта должны быть достаточно большими ($\alpha = 4\pi P/H > 0,1$ В/(см·Э), (0.1 ГГС), магнитоэлектрики должны быть хорошими изоляторами (электропроводность $\sigma < 10^{-11}$ Ом·см). К сожалению, таких веществ наберется не больше десятка. Это соединения типа BiFeO_3 , Cr_2O_3 , GaFeO_3 , YMnO_3 , $\text{BiFe}_5\text{O}_{12}$. Особенно драматичной была история исследований феррита висмута BiFeO_3 . Несмотря на то, что среди мультиферроиков он был синтезирован одним из первых, долгое время в нем не могли обнаружить ни линейного магнитоэлектрического эффекта, ни намагниченности. Как оказалось, причина крылась в существовании несоразмерной спиновой структуры [23]. Наличие спиновой циклоиды в мультиферроике феррита висмута BiFeO_3 приводит к тому, что усредненный по объему материала линейный магнитоэлектрический эффект и намагниченность равнялись нулю.

Причиной существования циклоиды служит неоднородное магнитоэлектрическое взаимодействие, описываемое вкладом в свободную энергию, пропорциональным производным от магнитного вектора L (или M) по направлению. Таким образом, неоднородное магнитоэлектрическое препятствовало наблюдению однородного взаимодействия, следствиями которого являлись линейный магнитоэлектрический эффект и намагниченность. И единственным способом заставить эти скрытые эффекты проявиться является разрушение циклоиды.

Как было показано в ряде авторов [18-22], разрушение циклоиды, сопровождающееся появлением линейного магнитоэлектрического эффекта и индуцированной электрической поляризацией намагниченности, наблюдается при фазовых переходах, вызванных:

- сильными магнитными полями [18, 19], в которых существование циклоиды становилось энергетически невыгодным

- напряжениями, возникающими в пленках при эпитаксиальном росте [20, 21]
- легированием редкоземельными примесями и созданием твердотельных растворов на основе феррита висмута [22], что приводило к изменению константы анизотропии и подавлению циклоиды.

Величины намагниченности и магнитоэлектрического эффекта, найденные с помощью измерений в сильных магнитных полях, находятся в согласии с величинами, полученными в тонких пленках и твердых растворах. Все эти исследования способствовали созданию мультиферроиков с улучшенными свойствами.

Авторами также разработан теоретический подход, позволяющий моделировать влияние электрического поля на магнитные фазовые переходы в мультиферроиках, происходящие в сильных магнитных полях [23]. Такие «перекрестные» фазовые превращения являются еще одним проявлением взаимодействия магнитной и электрической подсистем.

Пространственно модулированные спиновые структуры не только маскируют эффекты, но и могут быть причиной других, весьма интересных магнитоэлектрических явлений. Спиновая циклоида вследствие неоднородного магнитоэлектрического взаимодействия создает дополнительную электрическую поляризацию. Как выяснили исследователи в самое последнее время, именно этот механизм обуславливает сильные магнитоэлектрические эффекты в манганитах.

Это обстоятельство позволяет предположить, что магнитные неоднородности являются источником распределений электрической поляризации, что выводит исследования магнитоэлектриков и мультиферроиков в обширную область микромагнетизма с его разработанной системой представлений, теоретическими моделями и экспериментальными методиками. Такой синтез двух областей открывает новые, практически неисследованные возможности как в микромагнетизме, так и в магнитоэлектрических явлениях.

Нами были проведены теоретическое и экспериментальное исследования в области микромагнетизма магнитоэлектриков. В частности, проведенные расчеты объемной плотности заряда в линии Блоха (характерная спиновая структура в доменных границах) показали, что подобная магнитная неоднородность является электрическим диполем.

Расчеты распределения эффективного магнитного поля магнитоэлектрического происхождения, показывают, что доменные границы блоховского типа могут испытывать смещение под действием электрического поля, перпендикулярного плоскости доменной границы. Авторами в сотрудничестве с экспериментальной группой МГУ им. М.В. Ломоносова в пленках феррит гранатов было осуществлено наблюдение смещения границ магнитных доменов в электрическом поле путем создания поля высокой напряженности в месте локализации доменной границы с помощью заряженного острия [25].

Уменьшение характерных размеров магнитных неоднородностей, должно приводить к усилению эффекта, обусловленного неоднородным МЭ взаимодействием, а уменьшение размеров источника электрического поля к уменьшению напряжений необходимых для проявления эффекта, поэтому управление микромагнитной структурой электрическим полем становится особенно интересным в свете развития магнитной наноэлектроники (спинтроники). Как было показано в главе про микромагнитное моделирование магниторезистивные свойства нанообъектов спинтроники (магнитных наномостиков, нанопроволок, спин-вентильных структур) определяются положением магнитных неоднородностей в узловых элементах устройств [26]. Слой магнитоэлектрика, обменно-связанный со спинтронным нанообъектом, может играть роль диэлектрического затвора, позволяющего перестраивать его магнитные, проводящие и магниторезистивные свойства приложением электрического поля.

Микромагнетизм в магнитоэлектрических материалах является практически неисследованной областью, несмотря на то, что уровень развития исследований магнитоэлектрических материалов, физики микромагнитных явлений, а также нужды магнитной электроники уже подготовили базу для интенсивного развития этого

направления. Поэтому работы в данной области являются своевременными, практически значимыми, и могут дать новые научные результаты мирового уровня.

Магнитные и транспортные свойства планарных магнитных наноконтактов, содержащих доменную стенку

Данный цикл работ посвящен теоретическому исследованию магнитных и транспортных свойств наноконтактов, содержащих доменную стенку (ДС). Данная тематика относится к области наномagnetизма и спиновой электроники, и, в рамках этих областей науки и технологии, последнее время привлекает к себе особенно большое внимание. В первую очередь это связано с тем, что у ДС, помещенной в наноразмерный объект, изменяется внутренняя структура. В результате свойства системы (ДС + нанообъект), в первую очередь транспортные свойства, изменяются. Так, возникают эффекты сильного рассеяния электронов на ДС, передача момента количества движения (спина) от стенки к току и обратно. Таким образом, подобные исследования содержат в себе много важных и новых фундаментальных задач. Кроме того, они привлекают значительный практический интерес, в контексте работ по созданию новых образцов магнитной памяти, логических элементов и сенсорных систем со сверхвысокой чувствительностью, существенно основанных на магнитных наноструктурах с ДС.

Последние 5 лет коллективом авторов проводилось полномасштабное комплексное теоретическое исследование магнитных и транспортных свойств **плоского магнитного наноконтакта в форме наномостика**, содержащего доменную стенку. **Магнитные свойства.** Методом полномасштабного микромагнитного моделирования получены устойчивые магнитные состояния для доменной стенки для различных физических и геометрических параметров системы [27, 28]. Выделены различные типа наномостиков в зависимости от их магнитных свойств. Построено аналитическое описание механизма образования устойчивых состояний для доменной стенки; показано, что вблизи трикритической точки фазовая диаграмма допускает описание на языке теории фазовых переходов Ландау [28]. **Транспортные свойства.** Впервые рассчитано дополнительное сопротивление наномостика, обусловленное наличием в нем ДС, в предположении, что сопротивление ДС определяется эффектом спиновой аккумуляции, для различных параметров системы и положений доменной стенки [29-31]. При этом впервые оригинальным способом решена задача спиновой аккумуляции в двумерной системе. Показано, что магнитосопротивление системы существенно зависит от положения доменной стенки и других физических и геометрических параметров системы, что является следствием нелокальности механизма спиновой аккумуляции. Изучено частотное поведение системы и показано, что наномостики хорошо приспособлены к функционированию в качестве приложений, работающих в гигагерцовом диапазоне [32]. **Практические применения.** Показано, что исследуемые наноконтакты являются чрезвычайно перспективным для использования в качестве наноразмерных сенсоров магнитного поля со сверхвысокой чувствительностью или магнитных бистабильных элементов [28, 33, 34]. Изучены магнитные свойства наномостиков для параметров системы, близких к экспериментальным [33, 35]. Получены первые образцы наномостиков [35].

Наконец, в рамках сотрудничества с лабораторией Institut d'Electronique Fondamentale, CNRS/Université Paris-Sud (Орсэ, Франция) проведен анализ магнитных и транспортных свойств плоского наноконтакта в форме **двойного наномостика**, изготовленного на пленке $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ [36, 37]. Изучены магнитные свойства данной системы и проведена оптимизация геометрии [36]. На основании экспериментальных данных по магнитосопротивлению данного наноконтакта охарактеризованы структурные дефекты системы. Восстановлена картина перемагничивания данного устройства [37].

Перечень публикаций

1. V.I. Belotelov, A.K. Zvezdin, V.A. Kotov, *New magneto-optical materials on a nanoscale*, (Review article), Phase Transitions, special issue on Phase Transitions in Multiferroics 79 (12), pp. 73-89 (2006).
2. V.I. Belotelov, A.K. Zvezdin, *Magneto-optical Properties of Photonic Crystals*, глава в книге “Nonlinear and Integrated Magneto-Optics”, special issue of JOSA (Journal of the optical society of America) B, 22, p. 286-292 (2005).
3. A.K. Zvezdin, V.I. Belotelov, *Magneto-optical properties of photonic crystals*, European Physical Journal B, 37, n. 4, p. 479-487 (2004).
4. A.K. Zvezdin, V.I. Belotelov, P. Perlo, *Magneto-optics of granular materials and new optical methods of magnetic nanoparticles and nanostructure imaging*, глава в книге Metal-Polymer Nanocomposites, p. 201-240 (J.Wiley & Sons, Inc., NJ) 2004.
5. V.I. Belotelov, A.K. Zvezdin, *Electrodynamic Green functions technique in magneto-optics of low dimensional systems and nanostructures*, глава в книге “Nonlinear and Integrated Magneto-Optics”, special issue of JOSA (Journal of the optical society of America) B, 22, p. 228-239 (2005).
6. V.I. Belotelov, L.L. Doskolovich, A.K. Zvezdin, *Extraordinary magneto-optical effects and transmission through the metal-dielectric plasmonic systems*, Phys. Rev. Lett. 98, 77401(1-4) (2007).
7. V.I. Belotelov, L.L. Doskolovich, V.A. Kotov, and A.K. Zvezdin, *Magneto-optical properties of perforated metallic films*, Journal of magnetism and magnetic materials, 310, 3-2, e843-e845 (2007).
8. V.I. Belotelov, L.L. Doskolovich, V.A. Kotov, E.A. Bezus, D.A. Bykov, A.K. Zvezdin, *Magneto-optical Effects in the Metal-dielectric Gratings*, Opt. Commun. 278, 104-109 (2007).
9. V.I. Belotelov, A.K. Zvezdin, *Magneto-optics and extraordinary transmission of the perforated metallic films magnetized in polar geometry*, Journal of magnetism and magnetic materials, 300, 1, e260-e263 (2006).
10. M. Vasiliev, V.I. Belotelov, A.N. Kalish, V.A. Kotov, A.K. Zvezdin, K. Alameh, *Effect of Oblique Light Incidence on Magneto-optical Properties of One-Dimensional Photonic Crystals*, IEEE Trans. Magn., 42, 3, 382- 388 (2006).
11. M. Vasiliev, K.E. Alameh, V.I. Belotelov, V.A. Kotov, A.K. Zvezdin, *Magnetic Photonic Crystals: 1-D Optimization and Applications for the Integrated Optics Devices*, IEEE J. Lightwave Techn. 24, 2156-2162 (2006).
12. А.К. Звездин, Д.И. Плохов, *Нелинейная динамика квазиклассического спина в нестационарном магнитном поле*, ЖЭТФ, т. 124, вып. 1(7), с. 96-104 (2003).
13. А.К. Звездин, Д.И. Плохов, *Использование высокоспиновых магнитных частиц в квантовых вычислениях*, Кратк. сообщ. по физике ФИАН, вып. 12 (2003).
14. D.I. Plokhov and A.K. Zvezdin, *Linewidth of the Bloch-type spin oscillations induced by a swept magnetic field in large-spin magnetic molecules*, The Physics of Metals and Metallography, v. 101, suppl. 1, p. s94-s96 (2006).
15. D.I. Plokhov and A.K. Zvezdin, *Exchange interactions and full magnetization process of multi-spin nanocluster Mn₄*, Phys. Rev. B (2007) – в печати.
16. А.К. Звездин, А.П. Пятаков, *Фазовые переходы и гигантский магнитоэлектрический эффект в мультиферроиках*, УФН, т. 174, вып. 4, 465-470 (2004).
17. A.S. Logginov, A.P. Pyatakov, A.K. Zvezdin, *Magneto-electrics: new type of tunable materials for microwave technique and spintronics*, Proceedings of SPIE, v. 5955, p. 56-65 (2005).
18. А.М. Кадомцева, А.К. Звездин, Ю.Ф. Попов, А.П. Пятаков, Г.П. Воробьев, *Письма в ЖЭТФ*, т. 79, с. 705-716 (2004).
19. B. Ruetter, S. Zvyagin, A.P. Pyatakov, A. Bush, J.F. Li, V.I. Belotelov, A.K. Zvezdin, and D. Viehland, Phys. Rev. B 69, 064114 (2004).

20. Jiefang Li, Junling Wang, M. Wuttig, R. Ramesh, Naigang Wang, B. Ruetter, A.P. Pyatakov, A.K. Zvezdin, and D. Viehland, *Dramatically enhanced polarization in (001), (101), and (111) BiFeO₃ thin films due to epitaxial-induced transitions*, Appl. Phys. Lett. 84 (25) 5261 (2004).
21. F. Bai, J. Wang, M. Wuttig, J.F. Li, N. Wang, A. Pyatakov, A.K. Zvezdin, L.E. Cross, D. Viehland, Appl. Phys. Lett., v. 86, 032511 (2005).
22. N. Wang, J. Cheng, A. Pyatakov, A.K. Zvezdin, J.F. Li, L.E. Cross, D. Viehland, *Multiferroic properties of modified BiFeO₃ - PbTiO₃ - based ceramics: Random-field induced release of latent magnetization and polarization*, Phys. Rev. B, v. 72, n. 1, p. 1-5 (2005).
23. А.Г. Жданов, А.К. Звездин, А.П. Пятаков, Т.Б. Косых, D. Viehland, *Влияние электрического поля на магнитные переходы "несоизмерная – соизмерная фаза" в мультиферроике типа BiFeO₃*, Физика Твёрдого Тела, т. 48, вып. 1, с. 83-90 (2006).
24. A.S. Logginov, G.A. Meshkov, A.V. Nikolaev, A.P. Pyatakov, V.A. Shust, A.G. Zhdanov, A.K. Zvezdin, *Electric field control of micromagnetic structure*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, v. 310, issue 2, p. 2569-2571 (2007).
25. А. С.Логгинов, Г.А. Мешков, А.В. Николаев, А.П. Пятаков, *Магнитоэлектрическое управление доменными границами в пленке феррита граната*, Письма в ЖЭТФ, т. 86, вып. 2, с. 124-127 (2007).
26. A.V. Khvalkovskii and K.A. Zvezdin, *Position dependence of domain wall resistance in magnetic nanobridge*, J. Magn. Magn. Mater. 300 (1) (2006) e270-e273.
27. А.А. Звездин, К.А. Звездин. // Письма в ЖЭТФ, 75 (10) (2002) 613.
28. К.А. Звездин, А.В. Хвальковский. Фазовые превращения магнитной структуры в пленочных наномостиках. // Физика Тв. Тела, 47 (6) (2005) 1137-1146.
29. К.А. Звездин, А.В. Хвальковский. Магнитосопротивление плоского наномостика. // Ж. Техн. Физики, 74 (3) (2004) 37-43.
30. A.V. Khvalkovskii, A.A. Zvezdin, K.A. Zvezdin, D. Pullini, P. Perlo. Spin-accumulation effect in magnetic nanobridge. // J. Magn. Magn. Mater., 272-276 (2004) e1517-1518.
31. A.V. Khvalkovskii, K.A. Zvezdin. Position dependence of domain wall resistance in magnetic nanobridge. // J. Magn. Magn. Mater., 300(1) (2006) e270-e273.
32. A.V. Khvalkovskii, A.A. Zvezdin, K.A. Zvezdin. Frequency response of magnetic planar nanobridges. // J. Magn. Magn. Mater., 294 (2) (2005) e13-e15.
33. A.V. Khvalkovskii, K.A. Zvezdin, A.K. Zvezdin. Transport and magnetic properties of magnetic planar nanobridge. // Microelectronics Engineering, 81 (2-4) (2005) 336-340.
34. А.К. Звездин, К.А. Звездин. Заявка на изобретение РФ N 2001123953/20 (025538).
35. T. Arnal, R. Soulimane, A. Aassime, M. Bibes, Ph. Lecoeur, A.M. Haghiri-Gosnet, B. Mercey, A.V. Khvalkovskii, A.K. Zvezdin, and K.A. Zvezdin. Magnetic Nanowires Patterned in the La_{2/3}Sr_{1/3}MnO₃ Half-Metal. // Microelectronic Engineering, 78–79 (2005) 201-205.
36. T. Arnal, M. Bibes, A.V. Khvalkovskii, A. Aassime, Ph. Lecoeur, A.M. Haghiri-Gosnet, B. Mercey, A.K. Zvezdin, and K.A. Zvezdin. Low-field magnetoresistance in a nanopatterned manganite track. // J. Magn. Magn. Mater., 300 (1) (2006) e274-e276.
37. T. Arnal, A.V. Khvalkovskii, M. Bibes, Ph. Lecoeur, A.-M. Haghiri-Gosnet, and B. Mercey. Domain wall magnetoresistance in a nanopatterned La_{2/3}Sr_{1/3}MnO₃ track. // Phys. Rev. B, 75 (2007) R220409.