

На правах рукописи



ПЕТРЖИК Андрей Михайлович

МАГНИТОТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА МАНГАНИТНЫХ ТОНКИХ  
ПЛЁНОК, БИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ И МНОГОСЛОЙНЫХ  
ФЕРРОМАГНИТНЫХ СТРУКТУР

Специальность 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния»

Автореферат диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

МОСКВА – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН), Москва.

Научный руководитель: Овсянников Геннадий Александрович,  
доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты: Буш Александр Андреевич, доктор технических наук, директор НИИ материалов твердотельной электроники МГТУ Московского института радиотехники электроники и автоматики (МИРЭА).

Чичков Владимир Игоревич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник кафедры теоретической физики и квантовых технологий НИТУ Московского института стали и сплавов (МИСиС).

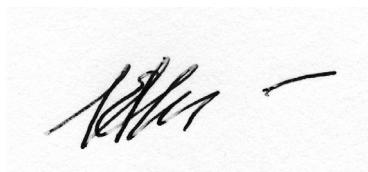
Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики микроструктур РАН, г. Нижний Новгород.

Защита состоится «5» декабря 2014 г. в 11-30, на заседании диссертационного совета Д 002.231.01, созданного на базе ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, по адресу: 125009, Москва, ГСП-9, ул. Моховая, д.11, корп. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и на сайте института:  
<http://cplire.ru/rus/dissertations.html>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физ. - мат. наук,  
доцент



Кузнецова  
Ирен Евгеньевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Редкоземельные магнитные перовскиты со структурой  $Re_{1-x}A_xMnO_3$  (Re – редкоземельные элементы типа La или Nd, а A – щелочноземельные металлы типа Sr или Ca) демонстрируют широкий набор необычных электрических и магнитных свойств, включая эффект колоссального магнетосопротивления [1]. Параметры эпитаксиальных плёнок существенно отличаются от свойств монокристаллов, причиной чему в частности является возникающее напряжение в плёнках, вызванное кристаллографическим рассогласованием с подложкой, на которую нанесена плёнка [2]. Определение электрических и магнитных характеристик  $La_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$  напряженных плёнок актуально при выборе оптимальной подложки для дальнейшего создания устройств электроники и спинтроники на основе манганитных пленок.

Помимо колоссального магнетосопротивления, связанного с высокополевым поведением манганитов, существует большое низкополевое магнетосопротивление, возникающее на границах гранул или на туннельном контакте двух ферромагнетиков [3]. Эффект наблюдается как в поликристаллах, так и в искусственных бикристаллических границах, которые образуются при росте пленок на бикристаллических подложках, или в многослойных туннельных структурах. Интерес к туннельному магнетосопротивлению во многом обусловлен возможностью его использования в различных устройствах: магниторезистивных считывающих головках, магнитных сенсорах, устройствах памяти и т.д.

В отличие от работ, авторы которых изучали бикристаллические границы магнитных материалов, нанесенных на подложки с разориентацией кристаллографических осей поворотом вокруг нормали к плоскости подложки (РБК), в работе соискателя рассматриваются наклонные бикристаллические контакты (НБК). НБК в большинстве случаев позволяют существенно улучшить по сравнению с РБК микроструктуру границы, снизить толщину

«мёртвого» (немагнитного) слоя и уменьшить концентрацию дислокаций в плоскости границы [4].

Туннельное магнетосопротивление наблюдается также в многослойных структурах из двух эпитаксиальных ферромагнитных плёнок, разделённых между собой слоем изолятора. В качестве ферромагнетиков были выбраны манганит  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$  (LSMO) и рутенат  $\text{SrRuO}_3$  (SRO). Гетероструктуры LSMO/SRO позволяют наблюдать отрицательную спиновую поляризацию в SRO (средняя спиновая поляризация носителей заряда на уровне Ферми противоположна направлению намагниченности) [5,6]. Отметим, что если в LSMO коэрцитивная сила составляет величину  $\sim 200\text{Э}$  и направление намагниченности как правило лежит в плоскости подложки, то в SRO коэрцитивная сила составляет порядка 1Тл и намагниченность направлена под углом к плоскости подложки (для плёнок на подложке  $\text{NdGaO}_3$  намагниченность оказывается направлена практически перпендикулярно плоскости подложки). Этот факт позволяет управлять магнитным состоянием системы, воздействуя на LSMO слой с помощью малых магнитных полей (порядка 200Э). Практически 100% поляризация манганитов ниже точки Кюри способствует возникновению высокого значения туннельного магнитного сопротивления (TMR) [4]. Ряд работ по исследованию сверхрешеток LSMO/SRO с помощью аномального эффекта Холла показал наличие на границе раздела LSMO/SRO ферромагнитно упорядоченного дырочного газа, что указывает на сильную связь этих ферромагнетиков. На это указывает также и экспериментально наблюдаемый сдвиг петли гистерезиса двухслойной структуры при приложении внешнего магнитного поля [7]. Для получения высокого магнетосопротивления между ферромагнетиками располагают слой изолятора, который уменьшает обменную связь между двумя ферромагнетиками. В качестве такой прослойки был выш  
плнгеорый

структур LSMO/SRO с разной толщиной дополнительной прослойки из  $\text{LaMnO}_3$  (LMO), а также измерение магнетосопротивления в этих структурах позволяет определить оптимальное значение толщины прослойки для создания спинтронных устройств на основе двух ферромагнитных эпитаксиальных плёнок.

Другим актуальным направлением исследований в физике твёрдого тела, привлекающим к себе в последнее время повышенный интерес, является изучение взаимодействия сверхпроводимости и магнетизма. Этот вопрос изучался как для магнитных сверхпроводников, так и для гибридных структур, содержащих сверхпроводники и магнитные материалы. Эффект близости в таких гибридных структурах обладает рядом нетривиальных особенностей [8]. Эти особенности приводят, в частности, к немонотонной зависимости критической температуры от толщины ферромагнитного слоя в двухслойных структурах сверхпроводник/ферромагнетик и к возбуждению триплетной сверхпроводимости. Несмотря на большое количество экспериментальных работ по данной тематике, большинство исследований структур сверхпроводник/ферромагнетик проводилось на поликристаллических плёнках, в которых отсутствует влияние кристаллической структуры контактирующих материалов и в силу этого не может наблюдаться ряд интересных эффектов. Изучение электрофизических свойств структур, содержащих сверхпроводящий купрат и манганит, учитывая высокую степень поляризации манганита и его хорошую химическую совместимость с купратами, интересно для исследования спин – зависимого электронного транспорта и эффекта близости. Выше описанные исследования могут быть полезны для создания спинтронных устройств на основе манганитов, что несомненно является актуальной задачей.

### **Цели работы**

1. Создание экспериментальной установки для измерения магнито-резистивных свойств тонких плёнок манганитов и многослойных гетероструктур при низких температурах под воздействием внешнего

магнитного поля величиной до 1 Тл. Отработка методики измерения кристаллографических и магнитных параметров многослойных тонкопленочных структур.

2. Определение влияния механических напряжений, вызванных рассогласованием кристаллических параметров эпитаксиальной плёнки и подложки на магнитные свойства напряженной манганитной плёнки.

3. Изучение магнетосопротивления и магнитных параметров манганитных бикристаллических контактов на основе плёнок LSMO в широком интервале температур и магнитных полей.

4. Изучение магнетосопротивления ферромагнитных двухслойных структур манганит/рутенат, разделённых прослойкой из  $\text{LaMnO}_3$ . Изучение влияния толщины прослойки на величину магнетосопротивления.

5. Экспериментальное исследование эффекта близости в сверхпроводящих структурах с манганитными LCMO, LSMO и LMO прослойками, и сравнение полученных данных с существующими теоретическими расчётами.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Создана экспериментальная установка измерения магнетосопротивления тонких плёнок во вставке в транспортный гелиевый дьюар. Температурный диапазон 4.2-300К, магнитные поля до 1Тл.

2. Зависимость сопротивления от температуры напряженных эпитаксиальных плёнок  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$  объясняется преобладанием механизма двойного обмена при  $T < 200\text{K}$  и не зависит от возникающих напряжений. Температура Кюри в зависимости от возникающих механических напряжений качественно описывается теорией Миллиса.

3. Экспериментально показано, что величина магнетосопротивления в наклонных бикристаллических контактах из LSMO увеличивается с ростом угла разворота кристаллографических осей, однако угол магнитной анизотропии при этом не изменяется. Показано, что наблюдаемое в

эксперименте магнетосопротивление определяется спиновым рассеянием в области бикристаллической границы.

4. Использование в магнитном туннельном переходе LSMO/SRO прослойки из недопированной манганитной пленки ограничивает величину магнетосопротивления из-за возникновения ферромагнитной фазы в прослойке из  $\text{LaMnO}_3$ .

5. Проводимость структур сверхпроводящий купрат - ниобий с прослойкой из манганита определяется эффектом близости, связанным с проникновением конденсатной волновой функции из бислоя Nb/Au в манганит и существенно зависит от прозрачности границы раздела. Сверхпроводящий ток в такой системе ограничен малой прозрачностью границы сверхпроводящий купрат / манганит и экспериментально не наблюдается.

#### **Научная новизна работы и представленных на ней результатов**

1. Экспериментально обнаружено, что ход температурной зависимости сопротивления эпитаксиальных плёнок  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$  в области низких температур (4.2-200К) не зависит от напряженности пленок, вызванной кристаллографическим рассогласованием с подложкой, что указывает на то, что проводимость определяется в этом диапазоне температур главным образом механизмом двойного обмеж

4. Показано, что проводимость структур сверхпроводящий купрат - ниобий с прослойкой из манганита определяется эффектом близости, связанным с проникновением конденсатной волновой функции из бислоя Nb/Au в манганит и существенно зависит от прозрачности границы раздела. Сверхпроводящий ток в такой системе ограничен малой прозрачностью границы купрат/манганит и экспериментально не наблюдается.

### **Достоверность полученных результатов**

Достоверность полученных результатов подтверждается многократными измерениями экспериментальных образцов и повторяемостью результатов измерений на нескольких образцах. Полученные экспериментальные результаты согласуются с теоретическими расчётами и данными, известными из литературы.

### **Практическая ценность работы**

1. Разработана методика измерения электросопротивления тонких плёнок в широком диапазоне температур под воздействием сильных внешних магнитных полей. Использование сверхпроводящего электромагнита из Nb<sub>3</sub>Sn с толщиной провода 0.1мм и внешним диаметром 20.5мм позволяет достигать магнитных полей до 1Тл при 12А, проводя измерения с использованием вставки в стандартный транспортный дьюар с жидким гелием. Отработана методика определения кристаллографических и магнитных параметров многослойных структур с использованием рентгеновского и нейтронного излучений соответственно.

2. Экспериментально обнаруженные в наклонных бикристаллических контактах физические механизмы рассеяния спинового состояния за счет сильного электрон-электронного взаимодействия и взаимодействия с антиферромагнитными магнонами дают ограничения на величину магнетосопротивления элементов спинтроники, создаваемых на основе бикристаллических контактов.



3. Экспериментально показано, что использование в магнитном туннельном переходе в качестве разделяющей обменное взаимодействие прослойки недопированной манганитной пленки ограничивает величину магнетосопротивления из-за возникновения ферромагнитной металлической фазы в прослойке из LMO.

### **Апробация работы**

Соискатель представил 9 докладов на научных конференциях: Moscow International Symposium on Magnetism (MISM'08), Moscow; "Wave Electronics and its Applications in Information and Telecommunication Systems 2009", St.Petersburg; "International Conference for Young Scientists Low Temperature Physics", Kharkov, Ukraine, 2010; "Нанофизика и наноэлектроника", Нижний Новгород, 2012; Всероссийская конференция молодых учёных "Микро-, нанотехнологии и их применение им. Ю.В. Дубровского", Черноголовка, 2012 г.; International conference on Nanoscale Magnetism (ICNM2013), 2013, Istanbul, Turkey; 48 Школа по физике конденсированного состояния, г. Зеленогорск Ленинградской области, 2014; XII конференция "Сильно коррелированные электронные системы и квантовые критические явления", г.Троицк, г.Москва, 2014; Moscow International Symposium on Magnetism (MISM'14), Moscow. Основные результаты диссертационной работы обсуждались на семинарах ИПЭ им. В.А. Котельникова РАН.

### **Публикации**

Основные результаты проведённых исследований опубликованы в 19 работах, в том числе в 10 статьях, из них 7 статей в журналах, входящих в Перечень российских рецензируемых научных журналов и 3 статьи в журналах, включенных в систему цитирования Web of Science. Также в сборниках трудов конференций опубликованы тезисы 9 докладов на международных и российских конференциях. Общий объем опубликованных по теме диссертации работ составил 67 мп. страниц.

## Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, обзора литературы, описания экспериментальных образцов и методики эксперимента, четырёх оригинальных глав и заключения, в котором представлены основные результаты работы. Работа содержит 76 страниц, 36 рисунков, 3 таблицы и список цитируемой литературы из 67 работ.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** даётся краткое описание предметов исследования: тонких плёнок манганитов, бикристаллических и туннельных магнитных переходов на их основе, а также гибридных сверхпроводящих гетероструктур с манганитной прослойкой. Обосновывается актуальность диссертационной работы.

**В главе 1** представлен обзор литературы. Рассмотрены основные кристаллографические, электрофизические и магнитные свойства монокристаллических магнитных перовскитов  $\text{La}_{1-x}(\text{Ca}, \text{Sr}, \dots)_x\text{MnO}_3$ . Рассматривается эффект колоссального магнетосопротивления и модель двойного обмена Зиннера, объясняющая возникновение металлической фазы в манганитах [1]. Описаны основные причины различия в транспортных и магнитных свойствах монокристаллов и эпитаксиальных тонких плёнок манганитов. Среди таких причин наибольшее значение имеет уровень нестехиометрии по кислороду [9], а также рассогласование кристаллографических параметров подложки и растущей на ней плёнки, вследствие чего возникают механические напряжения [2,10].

Описываются основные магниторезистивные эффекты, наблюдающиеся в манганитах и в структурах на их основе: колоссальное, анизотропное, гигантское и туннельное магнетосопротивления. Обсуждаются особенности двух основных методов создания магнитных туннельных переходов: использование бикристаллической подложки для образования бикристаллической границы в выращиваемой магнитной плёнке и напыление многослойной структуры из двух ферромагнетиков.

Рассматриваются особенности эффекта близости [8], связанного с проникновением конденсатной волновой функции из сверхпроводника в нормальный металл, в структуре сверхпроводник – манганит.

Ниже обзора литературы в параграфе 1.6 представлена **постановка задачи:**

1. Создание экспериментальной установки для измерения магнитно-резистивных свойств тонких плёнок манганитов и многослойных гетероструктур при низких температурах под воздействием внешнего магнитного поля величиной до 1 Тл. Отработка методики измерения кристаллографических и магнитных параметров многослойных тонкопленочных структур.
2. Определение влияния механических напряжений, вызванных рассогласованием кристаллических параметров подложки и выращенной на ней манганитной плёнки LSMO, на магнитные свойства манганитной плёнки.
3. Изучение магнетосопротивления и магнитных параметров манганитных бикристаллических контактов в широком интервале температур и магнитных полей. Определение причин ограничения величины магнетосопротивления.
4. Изучение магнетосопротивления ферромагнитных двухслойных структур манганит/рутенат, разделённых прослойкой из недопированного манганита. Определения влияния прослойки на величину магнетосопротивления.
5. Экспериментальное исследование эффекта близости в сверхпроводящих структурах с манганитными прослойками, сравнение полученных экспериментальных данных с существующими теоретическими расчётами.

**В главе 2** описывается методика изготовления экспериментальных образцов и методика эксперимента.

Экспериментальные образцы представляли из себя тонкие (20-120нм) эпитаксиальные плёнки и многослойные структуры (гетероструктуры), выращенные методом лазерной абляции на монокристаллических подложках размером 5x5x0.5мм. Напыление всех образцов производилось в атмосфере

кислорода при давлении  $P = 0.2 \dots 0.3$  мБар и при температуре подложки  $T = 700 - 800^\circ\text{C}$ . Последующее охлаждение производилось в атмосфере кислорода при давлении  $P = 1$  мБар.

Наклонные бикристаллические контакты (НБК) создавались путём напыления манганитной плёнки  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$  (LSMO) на бикристаллическую подложку из  $\text{NdGaO}_3$  (NGO) с симметричным поворотом плоскостей  $(110)\text{NdGaO}_3$  вокруг направления  $[1-10]\text{NGO}$  на углы  $2\theta = 6^\circ, 12^\circ$  и  $38^\circ$ . При эпитаксиальном росте кристаллическая структура подложки повторяется в манганитной пленке, в результате чего и образуется бикристаллическая граница в пленке.

Эпитаксиальные гетероструктуры  $\text{LSMO}/\text{LaMnO}_3/\text{SrRuO}_3$  суммарной толщиной порядка 100 нм выращивались на подложке NGO в вакуумной камере при давлении 0.3 мБар, а после охлаждения в атмосфере кислорода до комнатной температуры закрывались тонким (20-30 нм) слоем золота.

Гибридные гетероструктуры состава Nb-Au/манганит/ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  изготавливались схожим с  $\text{LSMO}/\text{LMO}/\text{SrRuO}_3$  гетероструктурами образом. Сверхпроводниковая купратная эпитаксиальная пленка  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  (YBCO) с критической температурой  $T_C = 88-89$  К изготавливалась методом лазерной абляции при температуре  $700-800^\circ\text{C}$  на подложке  $(110)\text{NGO}$ . Тонкая  $d_M = 5 \dots 20$  нм пленка M-прослойки из  $\text{LaMnO}_3$  (LMO), LSMO или  $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$  (LCMO) эпитаксиально выращивалась в той же вакуумной камере при высокой температуре, а потом закрывалась тонким (20-30 нм) слоем золота (Au) после охлаждения до комнатной температуры. Последующий слой ниобия (Nb) напылялся методом магнетронного распыления. Защитная пленка Au использовалась для уменьшения диффузии кислорода из оксидов.

Для проведения электрофизических измерений однослойных тонких плёнок на поверхность образца напылялись контакты из Pt толщиной порядка 100 нм, а для измерения гетероструктур с помощью литографии и последующего ионного травления изготавливались меза-структуры с целью обеспечить протекание тока перпендикулярно плоскости плёнки. Пять меза-

структур квадратной формы размерами от  $10 \times 10$  до  $50 \times 50$  мкм<sup>2</sup> соединялись с контактными площадками миллиметровых размеров с помощью пленки из Nb/Au (рис.1). Преимущественное протекание тока в меза-структуре по направлению нормали к плоскости подложки обеспечивалось изоляцией боковых граней меза-структуры с помощью слоя SiO<sub>2</sub>.

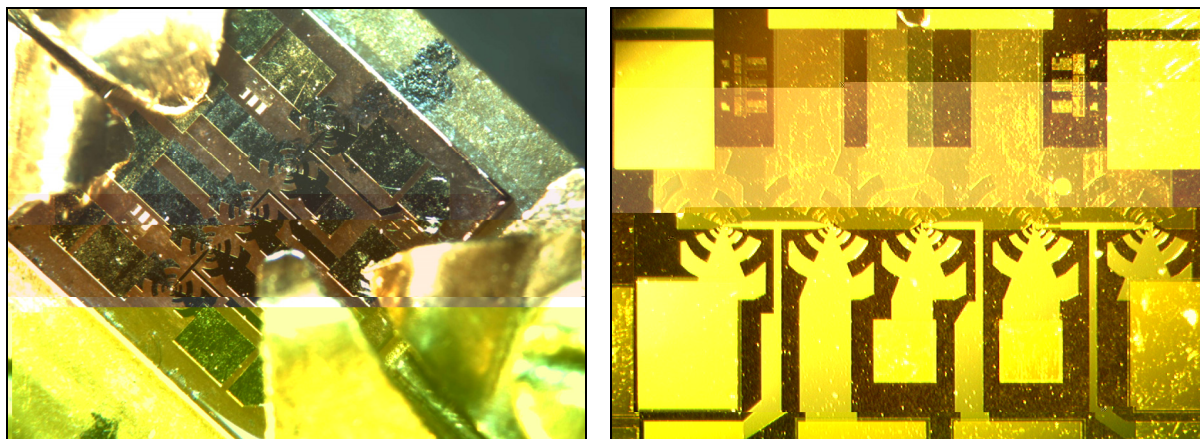


Рисунок 1. Фотографии экспериментального 5x5мм образца – меза-структуры, установленной в держатель, помещаемый в магнитный соленоид для проведения электрофизических измерений с прикладыванием внешнего магнитного поля. Справа – увеличенное изображение центральной части образца.

В главе представлены особенности использованного экспериментального стенда для проведения электротранспортных измерений и описан 4-точечный метод Монтгомери [11] по измерению электросопротивления. Стенд позволяет проводить измерения при температурах  $T=4.2 \dots 350\text{K}$ , измерять сопротивление  $R$  и дифференциальное сопротивление  $R_d$  при изменении напряжения, температуры, СВЧ излучения и внешних магнитных полей до 1Тл. Для исследования влияния магнитного поля на электрический транспорт в эпитаксиальных тонкоплёночных образцах использовались два магнитных соленоида, изготовленные из медной и сверхпроводящей проволоки. В последнем случае использовался провод из Nb<sub>3</sub>Sn диаметром 0.1мм. Катушка была изготовлена во ВНИИКП. Сверхпроводящий соленоид (рис. 2), имея внутренний диаметр намотки 1.3см и внешний диаметр 2.05см, позволяет в жидком гелии достичь 2.63Тл при силе тока 31А. При чуть большем токе магнит переходит в резистивное состояние. Оптимальный размер сверхпроводящего магнита с одной стороны позволяет проводить измерения в

стандартном транспортном дьюаре с жидким гелием, а с другой – разместить держатель с  $5 \times 5 \text{ мм}^2$  образцом внутри катушки. Калибровка магнита датчиком Холла дала практически линейную зависимость магнитного поля от тока питания с коэффициентом  $0.085 \text{ Тл/А}$  (рис. 2б).

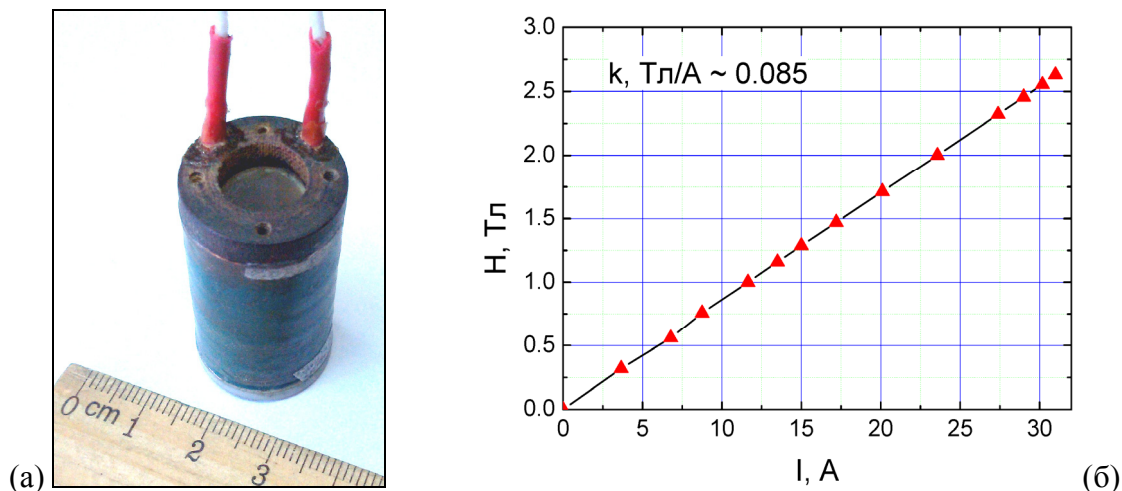


Рисунок 2. а) Фотография сверхпроводящего соленоида, помещаемого в транспортный гелиевый дьюар. б) Калибровка сверхпроводящей магнитной катушки.

Для определения магнитной анизотропии, а также значения температуры Кюри тонких плёнок манганитов и ферромагнитных слоёв гетероструктур использовался метод ферромагнитного резонанса (ФМР), основанный на свойстве ферромагнетиков резонансно поглощать СВЧ излучение. Кристаллографические параметры эпитаксиальных образцов определялись методом рентгеновской дифракции, толщины многослойных образцов – методами рентгеновской рефлектометрии и рефлектометрии неполяризованных нейтронов [12].

Модуль и направление намагниченности каждого магнитного слоя многослойной гетероструктуры определялись методом рефлектометрии поляризованных нейтронов с опорой на данные о суммарной намагниченности образца, полученные с помощью СКВИД магнитометра. Пучок нейтронов падал на образец под малым углом  $\theta$  к поверхности образца, внешнее магнитное поле было направлено перпендикулярно пучку в плоскости поверхности образца. При фиксированной температуре снимались 4 канала интенсивности малоуглового отражения:  $R^{++}(\theta)$ ,  $R^{--}(\theta)$ ,  $R^{+-}(\theta)$ ,  $R^{-+}(\theta)$ . Под + и –

следует понимать знак проекции спина нейтрона на внешнее магнитное поле. Для примера, в канале  $R^{++}(\theta)$  детектируется количество нейтронов, которые падали на образец, имея спин «вверх», и попали на  $He_3$  детектор после отражения от образца с тем же направлением спина (т.е. отразились без переворота спина). Изменяя угол падения пучка  $\theta$ , можно просканировать образец по глубине. Сняв все 4 канала отражения нейтронов, методами моделирования удаётся получить проекцию модуля и направления намагниченности на плоскость подложки каждого магнитного слоя гетероструктуры. Фотография используемого рефлектометра NREX (Гархинг, Германия) представлена на рисунке 3.



Рисунок 3. Нейтронный рефлектометр NREX, Гархинг, Германия.

**В главе 3** представлено исследование влияния механических напряжений на электротранспортные и магнитные свойства тонких плёнок LSMO, выращенных на различных подложках:  $(001)LaAlO_3$  (LAO),  $(001)SrTiO_3$  (STO),  $(110)NdGaO_3$  (NGO) и  $(LaAlO_3)_{0.3}(Sr_2AlTaO_6)_{0.7}$  (LSAT). В результате отличия кристаллографических параметров подложек от параметров плёнки LSMO возникали как растягивающие, так и сжимающие напряжения в плёнке LSMO. С помощью рентгеновской дифрактометрии показано, что при использовании подложек, кристаллографические параметры которых отличаются от параметров кристалла LSMO, удаётся получить эпитаксиальные

плёнки LSMO с кристаллографическими параметрами, отличными от табличного значения для кристалла LSMO. Магнитные свойства этих плёнок также отличаются от монокристаллов LSMO. Наибольшее значение одноосной магнитной анизотропии было зафиксировано с помощью метода ФМР в плёнке LSMO, выращенной на орторомбической подложке из NGO (рис. 4а), причём другие, даже более напряженные плёнки, но напыленные на кубические подложки, подобного эффекта не показывают. Показано, что зависимость Миллиса [2] для определения температуры Кюри по величине возникающих напряжений может быть применима для эпитаксиальных плёнок LSMO, изготовленных методом лазерной абляции. Температурная зависимость сопротивления всех плёнок при низкой температуре хорошо описывается степенной зависимостью  $T^{2.5}$ , которая следует из результатов расчета проводимости манганитов с использованием теории двойного обмена.

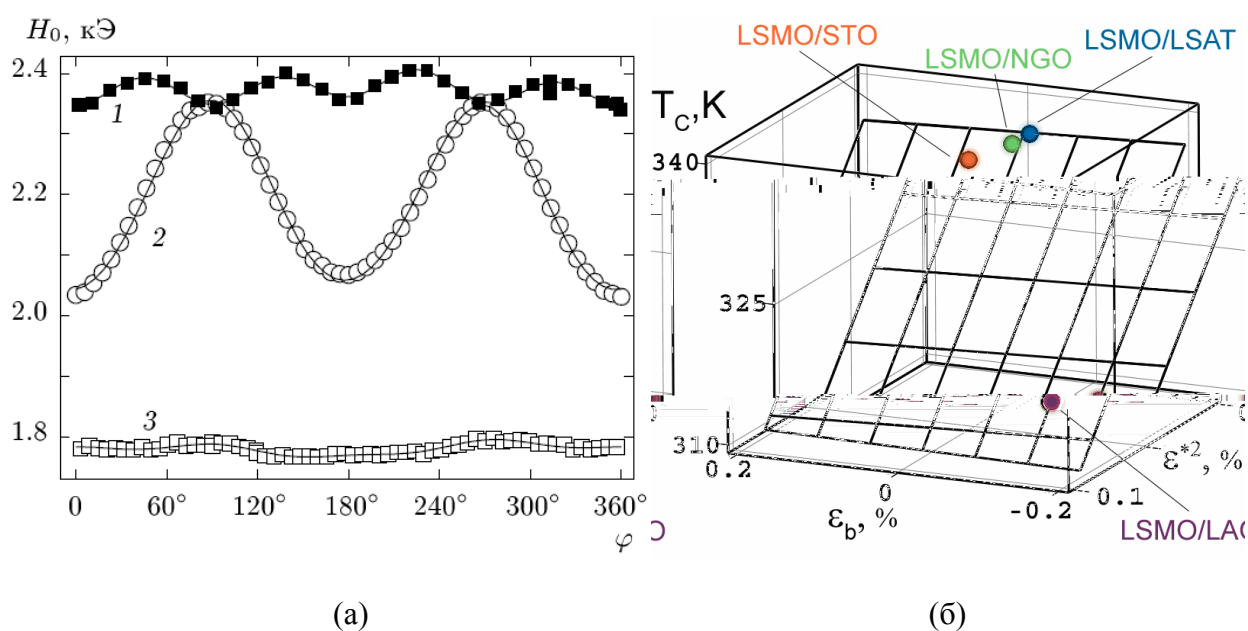


Рисунок 4. а) Угловые зависимости центрального поля ФМР плёнок LSMO, напыленных на различные подложки: LSAT (1), NGO (2) и STO (3),  $T=300\text{K}$ . б) Зависимость температуры Кюри  $T_C$  от объёмного  $\epsilon_b$  и квадрата двuosного  $(\epsilon^*)^2$  напряжений LSMO плёнок. Плоскость проведена по формуле Миллиса.

**Глава 4** посвящена исследованию магнетосопротивления и магнитотранспортных свойств наклонных бикристаллических контактов (НБК), созданных в LSMO плёнке с помощью бикристаллической подложки из NGO. Ранее было получено высокое значение магнетосопротивления в НБК



контактах на LSMO плёнках ( $MR \sim 150\%$  в полях до  $1\text{кЭ}$ ), однако полученные магнитные контакты имели достаточно высокое характерное сопротивление бикристаллической границы и низкие рабочие температуры [4]. Известно, что LSMO пленки более устойчивы к возникновению неоднородного магнитного состояния, к тому же ферромагнитная фаза в LSMO, находясь выше комнатной температуры, облегчает изучение и последующее использование магнитных свойств таких бикристаллических переходов.

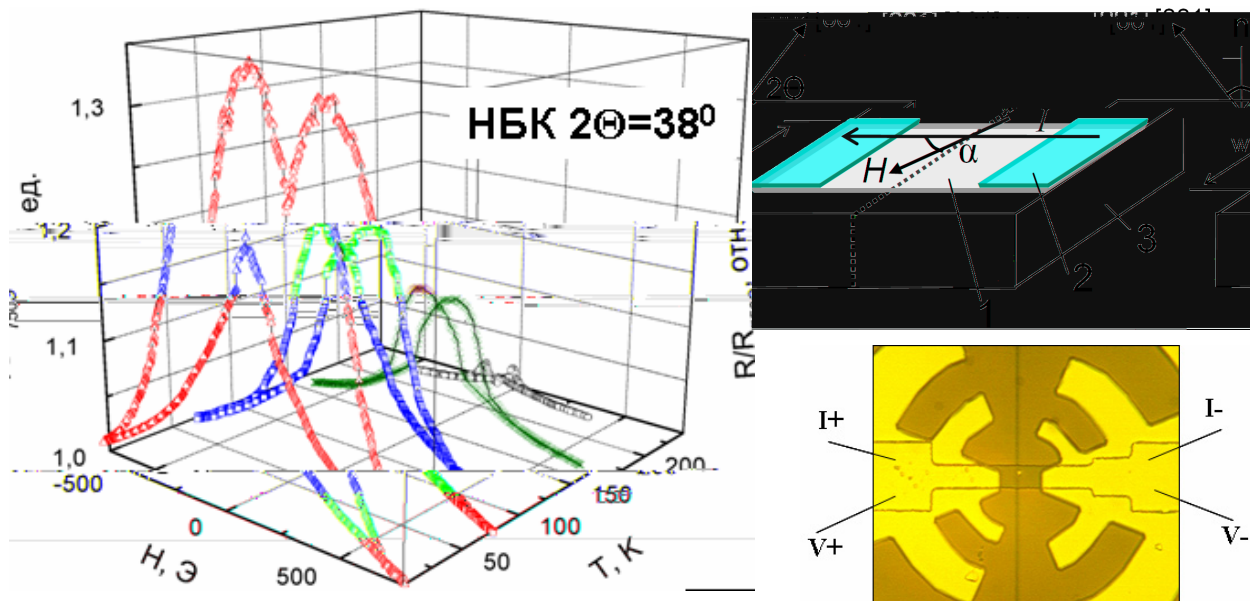


Рисунок 5. Зависимости магнетосопротивления, нормированного на сопротивление в поле  $H = 750 \text{ Э}$ , для LSMO НБК с углом разориентации  $2\theta = 38^\circ$  при четырех значениях температуры, магнитное поле параллельно току ( $H \parallel I$ ). Справа показано направление протекания тока  $I$ , кристаллографические оси бикристалла, направление внешнего магнитного поля  $H$ . Ниже - фотография центральной части экспериментального образца, ширина мостика  $w=8\text{мкм}$ .

Измерение угловой зависимости магнитного поля, соответствующего ферромагнитному резонансу в бикристаллических контактах, показало наличие двух ферромагнитно упорядоченных спиновых подсистем с мало различающимися (порядка 1 градуса) направлениями лёгких осей намагниченности. Оси направлены вдоль бикристаллической границы, и практически не зависят от угла кристаллографической разориентации частей бикристаллической подложки. С уменьшением угла разориентации  $MR'$  сильно уменьшается, при  $2\theta = 12^\circ$  составляет доли процента (рис. 5). Величина магнетосопротивления увеличивается с уменьшением температуры, что

вызвано ростом магнитной поляризации в LSMO пленке. При  $T = 4.2\text{K}$ , когда в LSMO пленках поляризация близка к 100%,  $MR' = (R - R_{750\text{Э}})/R_{750\text{Э}}$  составляет 30% для НБК с  $38^\circ$  разориентацией, что соответствует большому количеству неполяризованных носителей. Согласно расчётам, проведённым на основе [3], их в 6.7 раз больше, чем поляризованных. Из сравнения экспериментальных зависимостей проводимости НБК от напряжения и существующих теоретических моделей было выявлено, что малое значение магнетосопротивления может быть вызвано рассеянием спин - поляризованных носителей из-за сильного электрон - электронного взаимодействия в приграничном неупорядоченном слое при низких температурах и рассеянием на антиферромагнитных магнонах - при высоких.

В главе 5 описываются магнитотранспортные свойства магнитных туннельных переходов, созданных на основе многослойных гетероструктур.

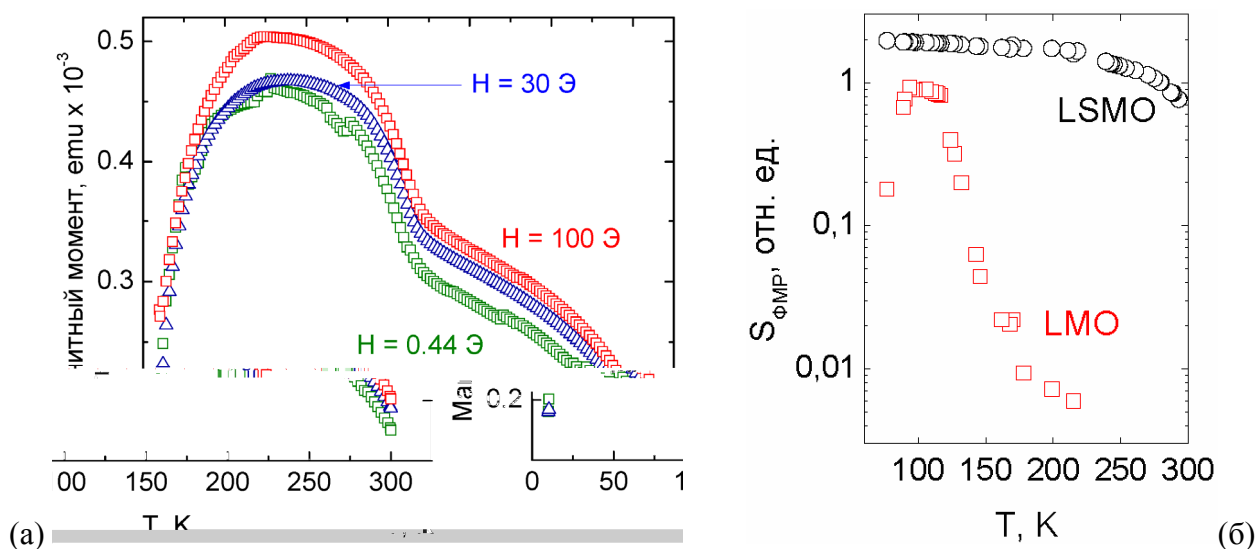


Рисунок 6. а) Магнитный момент гетероструктуры LSMO/LMO/SRO, измеренный СКВИД магнитометром. б) ФМР. Площади резонансных линий поглощения от LSMO и LMO,  $S_{\text{ФМР}}$  пропорциональна намагниченности.

Рассматриваются гетероструктуры  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3/\text{LaMnO}_3/\text{SrRuO}_3$  (LSMO/LMO/SRO). Прослойка LMO, в отличие от традиционно применяемой в туннельных контактах  $\text{SrTiO}_3$ , согласно теоретической работе [13], позволяет улучшить качество границы и исключить «мёртвые» (немагнитные) слои на границе LSMO/LMO и LMO/SRO. Однако экспериментальные образцы с толщиной прослойки  $\text{LaMnO}_3$  6.5 и 13нм показали резкое увеличение

магнитного момента в плоскости подложки при температурах  $T \leq 170\text{K}$ , что связано с увеличением намагниченности и в SRO, и в LMO слое. Причём величина намагниченности ниже  $150\text{K}$  в слое LMO достигает  $4\pi M_{\text{LMO}} = 4.2\text{кГс}$  ( $2.4 \mu_{\text{B}}/\text{Mn}$ ). Данные СКВИД магнитометрии подтверждаются данными, полученными с помощью ФМР и рефлектометрии поляризованных нейтронов. При температурах  $T \leq 100\text{K}$  измерения восприимчивости с помощью СКВИДа показали уменьшение магнитного момента в плоскости подложки (рис. 6). Это можно связать с обменным взаимодействием, наблюдающимся в структурах SRO/LSMO [7], и приводящим к антиферромагнитному упорядочению на границе. Магнетосопротивление меза-структуры LSMO/LMO/SRO уменьшается с увеличением толщины прослойки LMO, а при толщине прослойки  $d_{\text{LMO}} = 13 \text{ нм}$  наблюдается гистерезис по магнитному полю в полях порядка сотен Эрстед. В отсутствие LMO прослойки на зависимости  $R(H)$  наблюдается магнетосопротивление, вызванное отрицательной намагниченностью SRO пленки. Полученное значение магнетосопротивления, вероятно, во многом определяется нестехиометрией прослойки LMO по кислороду, в результате чего она становится ферромагнитной и проводящей, и с неоднородным растеканием тока в изготовленных меза-структурах микронных размеров. Также нельзя исключать влияние доменной структуры нанометровых размеров, образующихся в ферромагнитных плёнках.

В главе 6 приводятся результаты экспериментальных исследований гибридных сверхпроводниковых меза-структур с прослойкой из манганита  $\text{Nb}/\text{Au}/\text{M}/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ , посвященных вопросу взаимодействия магнетизма и сверхпроводимости [8]. Магнитоактивная прослойка (M) изготавливалась из манганитной пленки оптимального допирования  $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$  или  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ , либо из недопированной манганитной пленки  $\text{LaMnO}_3$ .

На рис. 7 показана трансформация проводимости  $\sigma(V)$  меза-структур с прослойкой из LSMO толщиной  $10 \text{ нм}$  при увеличении температуры выше гелиевой. Видно, что наблюдается уменьшение проводимости при малых напряжениях и перегиб зависимости  $\sigma(V)$  при напряжениях, соответствующих

щели ниобия. Сверхпроводящие корреляции проникают из сверхпроводника (Nb/Au) в М-прослойку и модифицируют плотность состояний.

Сверхпроводящий ток в структуре отсутствует вплоть до температуры 0.3 К и толщины  $d_M = 5$  нм, что может быть обусловлено пренебрежимо малым влиянием эффекта близости, связанным с проникновением конденсатной волновой функции из  $YBa_2Cu_3O_x$  (YBCO) в М-прослойку.

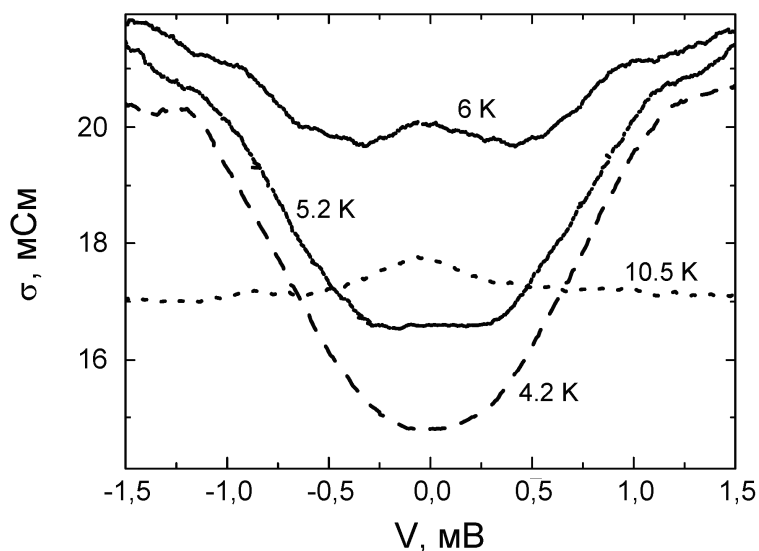


Рисунок 7. Семейство зависимостей проводимости от напряжения. Меза-структура с прослойкой из  $TcM(x)Tj12$  0 0 17.171.839650.680

## **В заключении представлены основные результаты работы:**

1. Создана экспериментальная установка измерения магнетосопротивления тонких плёнок во вставке в транспортный дьюар. В гелиевом дьюаре при температурах 4.2-8К достигаются магнитные поля до 1Тл, а при работе в азотном криостате (температурный диапазон 77-300К) – до 0.5Тл. Разработана методика определения кристаллографических и магнитных параметров многослойных структур с помощью рентгеновского и нейтронного излучений.
2. Исследованы магнитно-транспортные характеристики напряженных эпитаксиальных плёнок  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ . Показано, что слабое рассогласование (порядка 0.3%) кристаллографических параметров орторомбической подложки ( $\text{NdGaO}_3$ ) и плёнки ( $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ ), приводит к наблюдаемой сильной одноосной анизотропии магнитных свойств плёнки в плоскости подложки. Температурная зависимость сопротивления эпитаксиальных пленок  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$  при низкой температуре хорошо описывается степенной зависимостью  $T^{2.5}$ , которая объясняется в рамках модели двойного обмена.
3. Изменение температуры Кюри напряженных плёнок  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ , определенной по спектрам ферромагнитного резонанса, качественно описывается теорией Миллиса, учитывающей электрон-решеточное взаимодействие в дополнение к электрон-электронному взаимодействию в модели двойного обмена. Теория Миллиса учитывает как объемную, так и двухосную напряженность LSMO пленок.
4. Исследованы наклонные бикристаллические контакты на основе манганитной плёнки  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$  с углом разворота частей бикристаллической подложки до 38 градусов. Экспериментально показано, что величина магнетосопротивления увеличивается с ростом угла разворота плоскостей пленки, однако угол (порядка 1 градуса) разворота легких осей двух ферромагнитно упорядоченных спиновых подсистем существенно не изменяется. Наблюдаемое в эксперименте магнетосопротивление определяется спиновым рассеянием за счет сильного электрон-электронного взаимодействия

в соседней с бикристаллической границей области при низких температурах, а при высоких – рассеянием на антиферромагнитных магнонах.

5. Исследованы магнитные параметры гетероструктур  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3/\text{LaMnO}_3/\text{SrRuO}_3$  (LSMO/LMO/SRO). При температурах ниже 170К обнаружено резкое возрастание намагниченности, вызванное переходом слоёв LMO и SRO в ферромагнитное состояние. Магнетосопротивление мезоструктуры микронных (в плане) размеров уменьшается с увеличением толщины прослойки LMO, при толщине прослойки в 13 нм наблюдается гистерезис по магнитному полю в полях порядка сотен Эрстед. В отсутствие LMO прослойки на зависимости  $R(H)$  наблюдается магнетосопротивление, вызванное отрицательной намагниченностью SRO пленки.

6. Показано, что наличие особенностей на зависимости проводимости мезоструктур с манганитной прослойкой от напряжения обусловлено эффектом близости на границе ниобий/манганит. Однако в эксперименте сверхпроводящий ток не наблюдается, скорее всего из-за присутствия барьера на границе купратный сверхпроводник/манганит. Отклонение температурной зависимости проводимости мезоструктур от результатов расчёта вызвано магнито-активной природой барьеров, возникающих на границе манганитной прослойки и сверхпроводящих электродов.

Результаты диссертации опубликованы в **следующих работах**:

- A1. А.М. Петржик, И.В. Борисенко, К.И. Константибян, Г.А. Овсянников "Оксидные манганитные тонкоплёночные структуры для детектирования электромагнитного излучения терагерцового диапазона длин волн", Нелинейный мир №4, т.6, стр. 280-281 (2008).
- A2. Г.А. Овсянников, А.М. Петржик, И.В. Борисенко, А.А. Климов, Ю.А. Игнатов, В.В. Демидов, С.А. Никитов "Магнито-транспортные характеристики напряженных эпитаксиальных магнитных плёнок  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ ", Журнал экспериментальной и теоретической физики, том 134, вып. 6(12), стр. 1-9 (2008).
- A3. Демидов В.В., Борисенко И.В., Климов А.А., Овсянников Г.А., Петржик А.М., Никитов С.А., Магнитная анизотропия напряженных эпитаксиальных манганитных пленок; Журнал экспериментальной и теоретической физики, Том 139, Вып. 5, стр. 943 – 951 (2011).

A4. Петржик А.М., Овсянников Г.А., Шадрин А.В., Константилян К.И., Зайцев А.В., Демидов В.В., Кислинский Ю.В. Электронный транспорт в гибридных сверхпроводниковых гетероструктурах с манганитной прослойкой;