



Шайхулов Тимур Айратович

**СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ
ПЛЕНОК МАНГАНИТА ЛАНТАНА И ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ИХ
ОСНОВЕ**

Специальность 1.3.8 - Физика конденсированного состояния

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

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), г. Москва

Научный руководитель:

Овсянников Геннадий Александрович,

доктор физико- математических наук

Официальные оппоненты:

Владимир Игоревич Белотелов доктор
физико-математических наук, профессор
РАН, доцент кафедры фотоники и физики
микроволн Физического факультета
Московского государственного
университета имени М.В. Ломоносова.

Мария Александровна Морозова доктор
физико- математических наук профессор
кафедры нелинейной физики ФГБОУ ВО
«Саратовский национальный
исследовательский государственный
университет имени Н.Г. Чернышевского.»

Ведущая организация:

Федеральное государственное
автономное образовательное учреждение
высшего образования "Казанский
(Приволжский) федеральный университет"

Защита диссертации состоится «15» ноября 2024 г., в 11.00 на заседании
диссертационного совета 24.1.111.01 на базе ФГБУН Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН),
расположенном по адресу: 125009, Москва, ул.Моховая, д. 11, корп. 7.

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

Автореферат разослан « » _____ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
24.1.111.01 (Д002.231.01)

доктор физико-математических наук, доцент

Кузнецова Ирен Евгеньевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования

Многослойные плёночные структуры, состоящие из чередующихся слоев ферромагнитных и нормальных металлов, составляют одну из основ спинтроники. Большой интерес привлекают структуры, в которых ферромагнитные слои (ФМ) содержат оксиды переходных 3d металлов, а слои немагнитного металла (НМ) состоят либо из металлов с сильным спин-орбитальным взаимодействием, либо из оксидов 3d и 5d переходных элементов. Повышенное внимание к исследованию таких структур обусловлено необычайно разнообразными физическими явлениями, возникающими при контакте ФМ и НМ слоев [1]. Часть из этих явлений уже реально претендуют на практическое применение, особенно в элементах памяти и магнитного управления токами [2]. Одним из основных направлений исследования в работе является анализ влияния слоя НМ, контактирующего с ФМ слоем, на спектр ферромагнитного резонанса (ФМР). Это влияние не ограничивается увеличением затухания Гильберта за счет дополнительного канала релаксации, а в значительной мере связано с изменением свободной энергии системы за счет обменных взаимодействий на границе раздела [3], магнитного эффекта близости [4] и др. Все эти факторы оказывают влияние и на параметры спинового тока, возбуждаемого в условиях ФМР накачки. Получение однозначной связи между параметрами спинового тока и параметрами спектра ФМР является актуальной проблемой как с научной, так и с прикладной точек зрения, обеспечив значительное расширение информативности метода ФМР при анализе спин-зарядовых явлений.

Сильное спин-орбитальное взаимодействие в оксидах с 5d переходными металлами, которое сравнимо с энергиями кулоновского взаимодействия и кристаллического поля, вызывает множество интересных физических явлений [5], изучение которых представляет большой научный интерес.

Актуальным также является поиск новых ФМ и НМ материалов для тонкопленочных структур. В частности, в данной работе предполагается применение и исследование пленок иридата стронция (SrIrO_3), обладающего

целым рядом необычных свойств [6]. Особый интерес представляет изучение температурных зависимостей спектров ФМР и спиновой динамики, направленное на обнаружение новых фазовых состояний, индуцированных эффектами близости в двуслойных системах.

Целью настоящей диссертационной работы являлось создание эпитаксиальных пленок $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$, $\text{La}_{0.7}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$ и гетероструктур $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$, $\text{Pt}/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$, исследование их магнитных и транспортных свойств, используя методы ферромагнитного резонанса, магнитно-силовой микроскопии и резистивных измерений.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Вырастить эпитаксиальные гетероструктуры $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ и гетероструктуры $\text{Pt}/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ с эпитаксиальным слоем $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$.
2. Создать экспериментальную установку для регистрации спинового тока и ферромагнитного резонанса в гетероструктуре $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$, $\text{Pt}/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ в диапазоне 1-3 ГГц.
3. Изучить проводимости слоев, возникающих между пленками SrIrO_3 и $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ в гетероструктуре $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ и Pt и $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ в гетероструктуре $\text{Pt}/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$.
4. Зарегистрировать спиновый ток в гетероструктуре $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$.
5. Изучить магнитную анизотропию в пленках $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ при изменении их толщины. Определить оптимальные магнитные параметры для генерации спинового тока в пленках $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$.
6. Исследовать возникновение устойчивых резистивных состояний в эпитаксиальных пленках $\text{La}_{0.7}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$, выращенных на пьезоэлектрической подложке $(011)_{0.79}\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_{3-0.21}\text{PbTiO}_3$.

Научная новизна представленной диссертационной работы заключается в том, что впервые:

1. Впервые предложена замена платины на эпитаксиально выращенную в одном цикле с $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ пленку SrIrO_3 для регистрации обратного спинового эффекта Холла в гетероструктуре $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$.
2. Получена температурная зависимость проводимости слоя, образующегося на границе между слоем с сильным спин орбитальным взаимодействием SrIrO_3 и ферромагнитным слоем $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$, а также между платиной (Pt) и $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$.
3. Впервые зарегистрирован спиновый ток в гетероструктурах $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$
4. Обнаружено ферромагнитное упорядочение слоя SrIrO_3 в гетероструктуре $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ при температуре 60 К. Возникновение ферромагнетизма в слое SrIrO_3 обусловлено переносом электронов от Ir к Mn. Возникающая при этом избыточная концентрация носителей заряда (электронов в манганите и дырок в иридате), превышающая определенную критическую величину, способствует возникновению ферромагнитного упорядочения в иридате.

Теоретическая и практическая значимость работы

В диссертационной работе впервые обнаружена генерация спинового тока в гетероструктуре $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$, обнаружено магнитное упорядочение в пленке иридата, которая являлась верхней частью гетероструктуры $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$. Полученные в работе научные результаты могут быть в дальнейшем использованы при разработке и конструировании элементной базы спинтроники на основе исследованных наноструктур. Обнаруженные в рамках настоящей работы зависимости сопротивления от подаваемого напряжения для пленки $\text{La}_{0.7}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$, выращенной на пьезоэлектрической подложке $\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ могут быть использованы при создании логических элементов и элементов памяти в устройствах спинтроники.

Методология и методы исследования

Для изучения магнитных свойств эпитаксиальных пленок и гетероструктур использовались методы ферромагнитного резонанса и магнитно-силовой

микроскопии. Для исследования электронных транспортных свойств использовались методы резистивных измерений. Исследованные эпитаксиальные пленки и гетероструктуры изготавливались с помощью радиочастотного магнетронного распыления в смеси аргона и кислорода при высокой температуре 600-800С.

Положения, выносимые на защиту:

1. В гетероструктурах $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ в режиме ферромагнитного резонанса на частотах 2.6 ГГц и 9.6 ГГц возникает спиновый ток.
2. В структурах $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ и $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3/\text{SrIrO}_3$ образуется граничный слой с низким удельным сопротивлением. Величина удельного сопротивления для гетероструктуры $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ равна $\rho_1 = 5 \cdot 10^{-6}$ Ом·см, величина удельного сопротивления для гетероструктуры $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3/\text{SrIrO}_3$ равна $\rho_1 = 6 \cdot 10^{-5}$ Ом·см.
3. Для пленок $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$, выращенных на монокристаллических подложках NdGaO_3 с ориентацией (110), в диапазоне толщин до 150 нм зависимости поля магнитной одноосной анизотропии имеют немонотонное поведение с максимум магнитного поля $H_u = 147$ Э поля при 75 нм.
4. Ферромагнитное упорядочение слоя SrIrO_3 в гетероструктуре $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ возникает при температурах ниже 60 К.

Степень достоверности результатов и апробация работы

Достоверность основных положений и выводов диссертационной работы подтверждаются воспроизводимостью полученных экспериментальных результатов и их согласованием с теоретическими расчетами, опубликованными в рецензируемых журналах. Надежность полученных результатов обеспечивается определением и использованием оптимальных параметров экспериментальных установок, использованием известных экспериментальных методик и применением современной приборной базы. Порученные результаты опубликованы в рецензируемых научных журналах.

Публикации

По материалам диссертации опубликованы 22 научные работы, в том числе: 6 статей – в журналах, вошедших в Перечень изданий, рекомендованный ВАК

Минобрнауки РФ, 9 статей – в журналах, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования *Scopus* и *Web of Science*, 7 статей – в трудах международных и российских конференций.

Личный вклад автора

Автор разработал и оптимизировал метод синтеза тонких пленок, провел измерения спинового тока и ферромагнитного резонанса на гетероструктуре, включенной в микроплоскую линию, измерил резистивные характеристики пленок $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$, $\text{La}_{0.7}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$. Автором была проведена обработка и интерпретация результатов эволюции доменной структуры в пленках $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ и зависимости магнитных анизотропий в пленках $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$. Автор провел расчет экспериментальной зависимости проводимости границы гетероструктур $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ и $\text{Pt}/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка используемой литературы. Общий объем исследования составляет 99 страниц, и содержит 36 рисунков. Список литературы содержит 155 наименований.

Основное содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации и определены ее цели. Сформулированы научная новизна, практическая ценность работы и положения, выносимые на защиту.

Первая глава носит обзорный характер. В ней дан краткий обзор материалов, используемых в данной диссертации. Описана структура ферромагнитных доменов в пленках манганитов и описан метод магнито-силовой микроскопии (МСМ). Приведены теоретические описания макроспиновой модели магнитной динамики и уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта, впоследствии используемые для интерпретации данных полученных в ходе экспериментов. Описывается методика определения магнитных параметров пленок с помощью ферромагнитного резонанса. Приводится методика генерации и детектирования спинового тока в двухслойках

ферромагнетик/нормальный металл. Описываются примеры магнитных логических устройств на основе гетероструктур с ферромагнитными материалами.

Во второй главе описывается процесс создания эпитаксиальных тонких пленок SrIrO_3 и $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$, а также установка магнетронного распыления, позволяющая создавать гетероструктуры $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ и $\text{Pt}/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$, используемые в данной диссертации. Приведены рентгеновские дифрактограммы, как для отдельных пленок, так и для гетероструктур.

Приведена эволюция доменной структуры пленок $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ от толщины. На рисунке 1 представлены MCM изображения, полученные при внешнем магнитном поле равно нулю и при комнатной температуре. Наблюдаемые яркие и темные контрастные изображения представляют домены с различной магнитной ориентацией локальной намагниченности вдоль внеплоскостного направления, поскольку данные MCM соответствуют только внеплоскостной составляющей намагниченности. Полосовые домены образуются за счет конкуренции между обменной энергией, магнитостатической энергией и энергией магнитной анизотропии. Изображения MCM, представленные на рисунке 1, показывают эволюцию магнитной доменной структуры в пленках $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ в зависимости от толщины. Образцы тоньше 30 нм (рисунок 1а) не показывают контраста MCM. Аналогичная ситуация наблюдалась в [7]. При увеличении толщины до 75 нм контраст MCM увеличивается, и наблюдается появление полосовой доменной структуры (рисунок 1б). Данный тип доменов является признаком пленок с намагниченностью, направленной перпендикулярно плоскости подложки и, таким образом, указывают на наличие перпендикулярной намагниченности в пленках толщиной более 75 нм .

При дальнейшем увеличении толщины пленки до 104 нм полосовые домены становятся более отчетливыми, а при толщине 147 нм форма доменов становится лабиринтной; аналогичная форма доменов наблюдается в образцах $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$, полученных на подложках LaAlO_3 [8]. Мы получили две

критические точки по толщине пленки $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ при 75 нм и 150 нм, где происходит трансформация формы доменов.

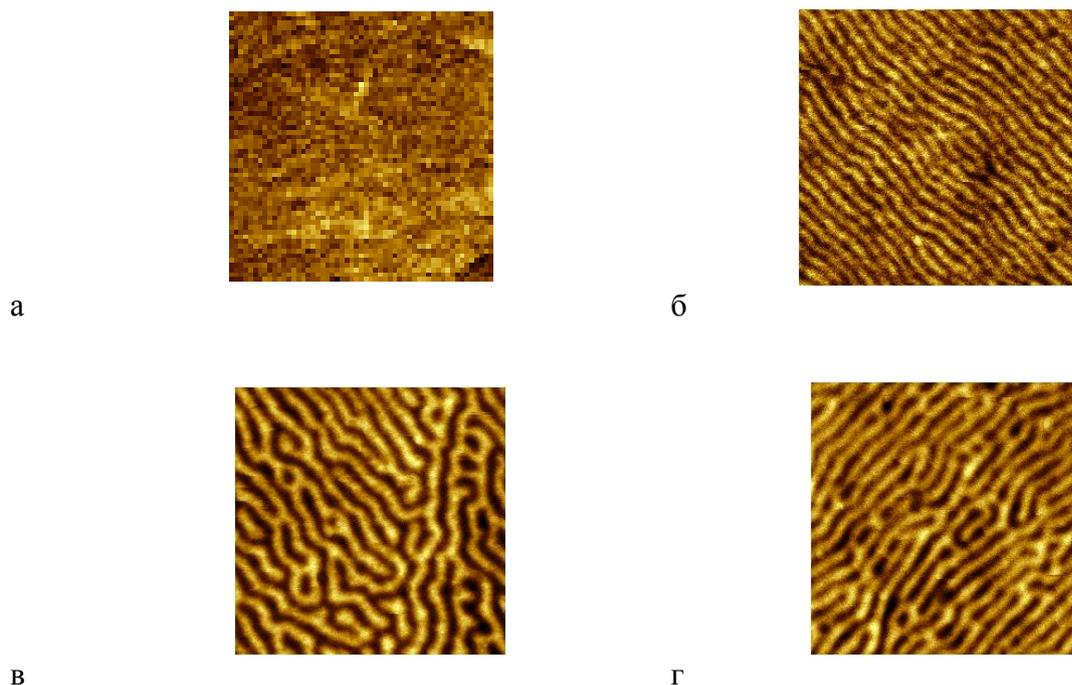


Рисунок 1. MFM-изображения без внешнего поля нанесенных на подложки $\text{NdGaO}_3(110)$ тонких пленок $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ толщиной: а) 30 нм б) 75 нм, в) 147 нм, г) 200 нм.

Приведен результат измерения зависимости намагниченности от толщины для тонких пленок $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$.

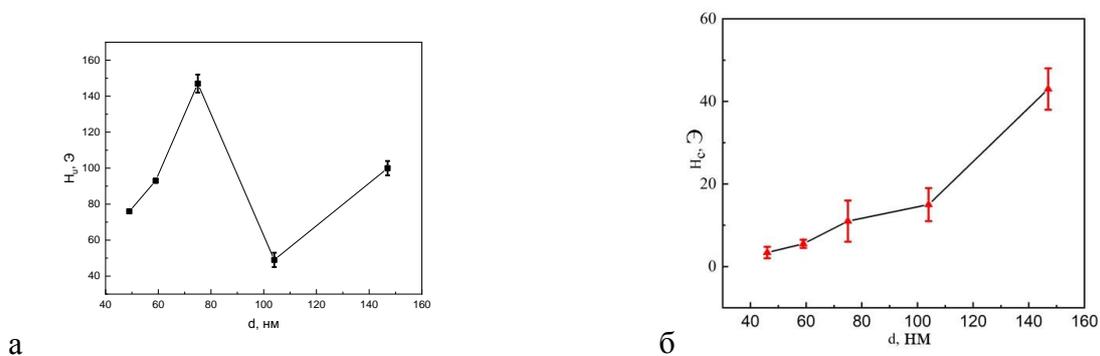


Рисунок 2. а) Зависимость поля одноосной магнитной анизотропии H_u от толщины пленок. б) зависимость поля кубической магнитной анизотропии от толщины.

На рисунок 2 показаны зависимости магнитных параметров $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ пленки от толщины, а именно полей одноосной (а) и кубической (б) магнитной анизотропии. Измерения проводились на спектрометре Bruker ER 200 на частоте 9,2 ГГц при комнатной температуре. Метод определения параметров магнитной анизотропии заключался в обработке угловых зависимостей резонансных полей спектров ФМР. Использовалось решение уравнения Ландау-Лифшица для эволюции намагниченности во внешнем постоянном

магнитном поле под действием магнитной составляющей радиочастотного поля, которое дает аналитическое соотношение для резонансного поля и частоты СВЧ поля для системы с одним ферромагнитным слоем [9]. Для серии образцов отчетливо виден пик в точке 75 нм для одноосной анизотропии. Похожая ситуация показана в [10], но для толщин пленок от 11 нм до 22 нм. Резкое увеличение магнитной анизотропии в пленках $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ толщиной 11 нм было связано с анизотропной деформацией. По мере увеличения толщины $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ пленки происходит образование сателитных ростовых доменов в пленке, что должно объяснять заметное подавление плоскостной магнитной анизотропии. Мы предполагаем, что, в отличие от работы [10], при нашем режиме распыления сателитные пики (дополнительные пики на рентгенограмме рядом с основным пиком от пленки $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$) образуются при толщинах выше 75 нм. Рост кубической анизотропии, обуславливаемый изменением кристаллографических параметров пленки, объясняет заметное подавление плоскостной магнитной анизотропии, поскольку по мере увеличения толщины пленки $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ образуются сателитные ростовые домены, вызывающие снятие анизотропного напряжения.

В третьей главе приведены рентгеновские спектры лантан-бариевых пленок ($\text{La}_{0.7}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$) используемых в данной главе для измерения зависимости сопротивления от напряжения, поданного на пьезоэлектрическую подложку. Описан метод проведения эксперимента.

Так же обсуждаются результаты измерения проводимости $\text{La}_{0.7}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$ пленок под действием напряженности, вызванной деформацией подложки. Было установлено, что трехмерное сжатие кристаллической решетки увеличивает амплитуду вероятности перескока в модели двойного обмена, что ведет к увеличению температуры Кюри (T_c), в то же время двухосные искажения ян-телеровского типа вызывают усиление локализации электронов и уменьшают T_c [11]. Хотя в рамках модели двойного обмена магнитные и резистивные параметры тесно связаны, отсутствует ясность в механизме изменения резистивных свойств эпитаксиальных манганитных пленок при воздействии деформации. В тоже время управление резистивных состояний

эпитаксиальных манганитных пленок представляет собой одно из направлений развития стрейнтроники [12]. Манганитные пленки, для которых температура Кюри T_c близка к комнатной, особенно привлекательны для практически применений. Ферромагнитный фазовый переход для однофазного кристалла $\text{La}_{0.7}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$ происходит при $T_c=345\text{K}$. В монокристалле $\text{La}_{0.7}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$ наблюдалась гигантская магнитострикция (до $4 \cdot 10^{-4}$) при температуре, равной температуре Кюри [13]. Ранее сообщалось, что магнитные и резистивные свойства эпитаксиальных $\text{La}_{0.7}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$ пленок сильно изменяются при росте на разных подложках из-за влияния деформации решетки пленки, вызванной подложкой [14].

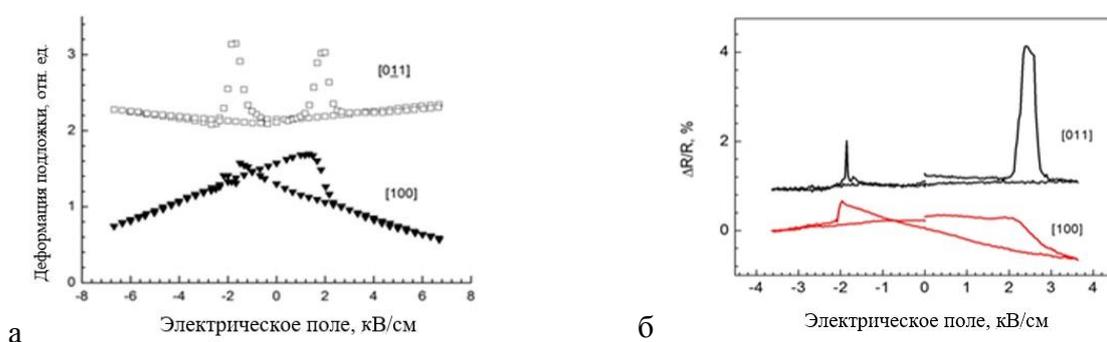


Рисунок 3. а) Деформация подложки $(011)_{0.79}\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$, измеренная при двух направлениях протеканий тока. б) зависимость сопротивления пленки $\text{La}_{0.7}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$ от напряженности приложенного электрического поля для двух направления протекания заданного тока.

Деформация подложки $(011)_{0.79}\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ измерялась с помощью тензодатчика, приклеенного к подложке. Наблюдается деформация растяжения подложки (1000 ppm) в направлении $[011]_{0.79}\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ при напряженности подложки, равной коэрцитивной силе сегнетоэлектрической петли $E_{c+}=2\text{ kV/cm}$ при положительном задании поля и таком же значении $E_{c-}=-2\text{ kV/cm}$ при отрицательном. Деформация сжатия вдоль направления $[001]_{0.79}\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ существенно меньше (около 500 ppm) и наблюдается также при напряженности электрического поля равного коэрцитивной силе, хотя видна асимметрия по знаку электрического поля. Наблюдаемые пики деформации подложки при напряженности поля вблизи коэрцитивной силы скорее всего вызваны вращением вектора поляризации [15]. Следует обратить внимание, что в направлении $[011]_{0.79}\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ в отсутствие

электрического поля отсутствует деформация подложки. Следовательно, в отсутствие поля должны отсутствовать резистивные состояния в пленке $\text{La}_{0.7}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$.

Результаты измерений зависимости изменения сопротивления $\text{La}_{0.7}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$ пленки от напряженности электрического поля для двух направлений протекания тока $[0\bar{1}1]$ $\text{La}_{0.7}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$ и $[001]$ $\text{La}_{0.7}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$ представлены на рисунке 3б. Видно, что в целом изменение сопротивления $\text{La}_{0.7}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$ пленки соответствует деформации подложки: имеется большое изменение сопротивления пленки, измеренного при токе вдоль направления $[0\bar{1}1]$ $\text{La}_{0.7}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$ при величине напряженности электрического поля равной коэрцитивной силе. Наиболее сильное изменение сопротивления $\text{La}_{0.7}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$ пленки наблюдается для направления $[0\bar{1}1]$ при напряженности электрического поля, равного коэрцитивной силе сегнетоэлектрической петли.

В четвертой главе приведены результаты рентгеновских параметров гетероструктур иридат-манганит $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$, показывающие эпитаксиальный рост слоев гетероструктуры иридат-манганит. Кристаллическая структура гетероструктур анализировалась с помощью рентгеновского дифрактометра. На рисунке 4а показано рентгеновское 2θ - ω сканирование тонкой пленки $\text{SrIrO}_3/\text{NdGaO}_3$. Наблюдаемые пики соответствуют кратным отражениям от плоскости подложки (110) NdGaO_3 и плоскости пленки (001) SrIrO_3 . Аналогичную картину можно увидеть для пленки $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3/\text{NdGaO}_3$ (рисунок 4б). Ориентация пленки (001) $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3\parallel(110)\text{NdGaO}_3$. 2θ - ω скан для гетероструктуры $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3/\text{NdGaO}_3$ является суперпозицией сканов однослойных пленок. Следовательно, для гетероструктуры плоскости растут таким образом, что $(001)\text{SrIrO}_3\parallel(001)\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3\parallel(110)\text{NdGaO}_3$.

В главе также приведены температурные зависимости сопротивления граничного слоя R_I трех гетероструктур $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3/\text{SrIrO}_3$, $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ и $\text{Pt}/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$, которые представлены на рисунке 5. Наблюдается зависимость R_I как от материалов граничащих пленок, так и от последовательности роста пленок.

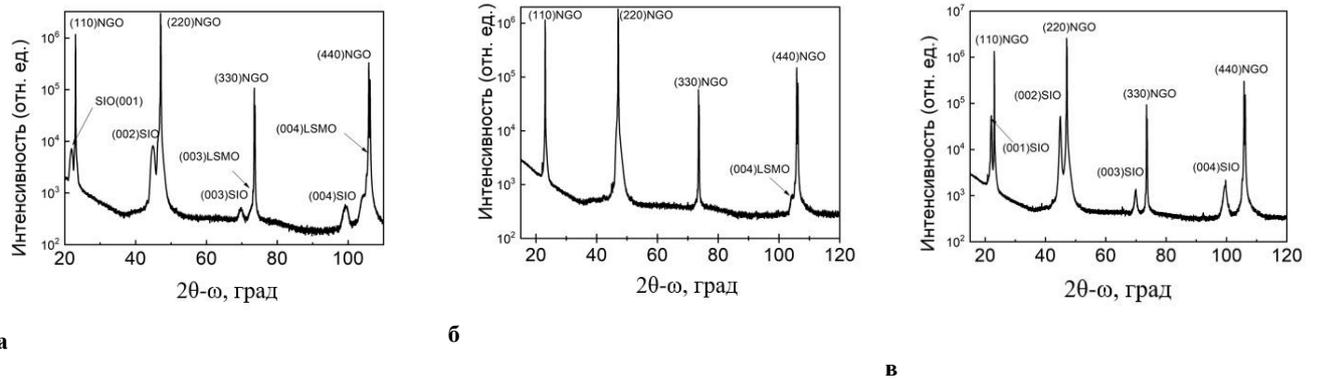


Рисунок 4. а) рентгеновский скан 2θ - ω гетероструктуры $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ нанесенной на подложку (110) NdGaO_3 б) - рентгеновский скан 2θ - ω пленки $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$, нанесенной на подложку (110) NdGaO_3 . в) рентгеновский скан 2θ - ω пленки SrIrO_3 , нанесенной на подложку (110) NdGaO_3 .

При низкой температуре удельное сопротивление граничного слоя $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$, в предположении, что его толщина составляет 1 нм, равно $\rho_1 = 5 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$. Столь малое значение удельного сопротивления граничного слоя указывает на возможность существования двумерного электронного газа с высокой подвижностью [16]. Оксиды переходных металлов из-за наличия сильных электронных корреляций существенно отличаются от простых металлов. Наличие большого числа степеней свободы – спиновой, зарядовой, решеточной и орбитальной – приводит к сложности поведения этих материалов, особенно в области границ. Зарядовый транспорт на границе в гетероструктуре существенно отличается от транспорта в отдельных пленках и простых металлах [16]. Для гетероструктур с иридатом возникновение

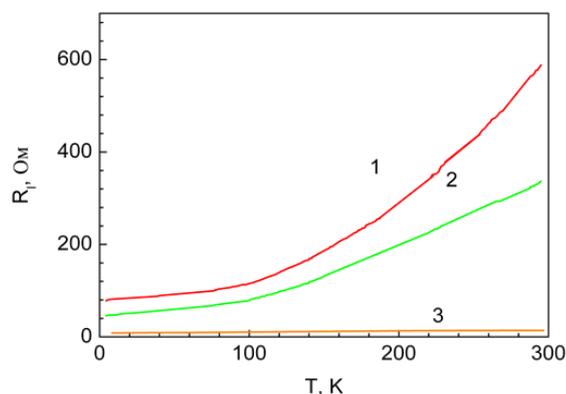


Рисунок 5. Температурная зависимость сопротивления границ R_1 гетероструктур $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3(15\text{нм})/\text{SrIrO}_3(10\text{нм})$ – кривая 1, $\text{SrIrO}_3(10\text{нм})/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3(12\text{нм})$ - 2, $\text{Pt}(10\text{нм})/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3(20\text{нм})$ - 3

проводящего слоя объясняется в работе [17] и состоит в том, что из-за перетекания заряда от иридата к манганиту увеличивается дырочное допирование, в то же время манганиты допируются электронами.

В последней части главы приведены результаты исследований гетероструктуры $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ методом ферромагнитного резонанса. Описано возникновение ферромагнитного упорядочения в гетероструктуре $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ в слое SrIrO_3 при 60 К. При температурах ниже 70 К появляется новая резонансная линия (рисунок 6), происхождение которой можно объяснить упорядочением спиновой системы электронов в слое SrIrO_3 .

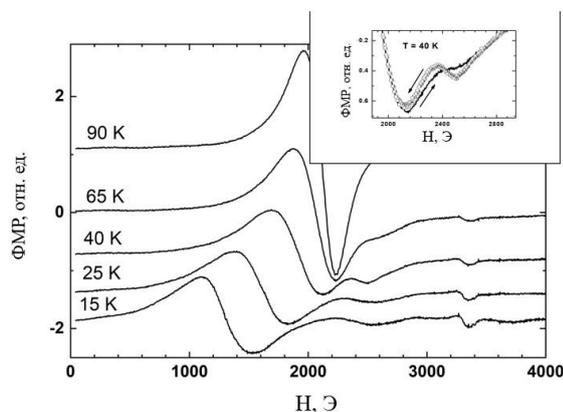


Рисунок 6 Спектры магнитного резонанса в структуре $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$, полученные при нескольких температурах в области предполагаемого ферромагнитного упорядочения в слое SrIrO_3 . На вставке показана часть спектра, полученного при 40 К как в случае увеличения (сплошная кривая), так и в случае уменьшения (точки) внешнего магнитного поля (направление изменения поля продублировано стрелками).

Мы имеем дело с появлением нового сигнала ФМР в гетероструктуре $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$. Дополнительным свидетельством принадлежности новой линии ФМР является сужение линии при обратной развертке магнитного поля (вставка рисунок 6) Такое сужение можно объяснить тем, что внешнее магнитное поле стимулирует ферромагнитное упорядочение в пленке SrIrO_3 .

Пятая глава посвящена обсуждению спинового тока в гетероструктурах $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ и $\text{Pt}/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$. В главе приведен один из основных результатов данной работы-возбуждение спинового тока в гетероструктурах на основе манганитов $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$, $\text{Pt}/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$. Так же приведены результаты температурной зависимости спинового тока в гетероструктурах $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$, $\text{Pt}/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$.

В главе приведен типичный сигнал $V(\varphi_0)$, обнаруживаемый на пленке SrIrO_3 , который показан на рисунке 7. Спиновый ток создает постоянное напряжение, генерируемое в условиях ферромагнитного резонанса. Кроме того, следует учитывать постоянное напряжение, возникающее из-за наличия анизотропного магнитосопротивления (АМС) в ФМ-слое. В результате полное постоянное напряжение должно быть записано как

$$V(\varphi_0) = V^{AMC} \sin 2(\varphi_0 - \psi) \sin \varphi + V^{SP} \sin^3 \varphi_0 \quad (1)$$

где φ_0 — угол между внешним магнитным полем и направлением измеряемого тока, ψ — угол между легкими осями манганита и направлением тока. Вращая внешнее поле H в плоскости подложки, мы измеряем напряжение для углов в диапазоне 180° с шагом 10° .

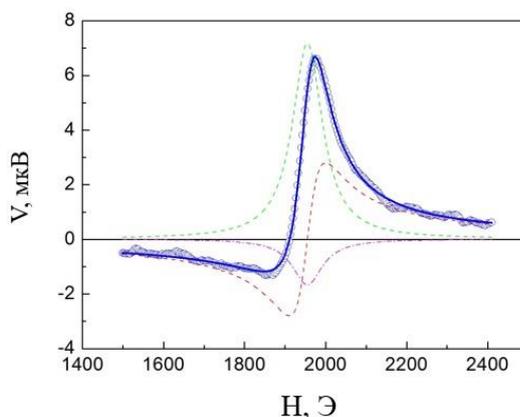


Рисунок 7. Напряжение, возникающее в гетероструктуре $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ при изменении магнитного поля при комнатной температуре (синие точки). Штриховые зеленая и красная линии представляют симметричную и антисимметричную часть сигнала АМС, а штрихпунктирная пурпурная линия представляет сигнал от спиновой накачки. Сплошная синяя линия представляет собой сумму трех вкладов (1).

Напряжения V^{SP} и V^{AMC} изменяются при инверсии направления H . Поскольку паразитный вклад постоянен для противоположных ориентаций магнитного поля, мы используем разницу для сигналов с противоположными ориентациями магнитного поля, чтобы исключить этот паразитный вклад. Чтобы разделить симметричный сигнал на эффекты спиновой накачки и анизотропного магнитосопротивления, мы измерили зависимость напряжения от угла между направлениями зарядового тока и магнитного поля H (в нашем случае намагниченность параллельна H). Вращая внешнее поле H в плоскости пленки,

измерялось напряжение для углов в диапазоне 180 градусов с шагом 10 градусов.

На рисунке 7 показано, как экспериментальный отклик описывается суммой двух вкладов, обусловленных спиновым током через границу раздела и анизотропным магнитосопротивлением в $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ пленке.

В ходе основных экспериментов для гетероструктуры $\text{Pt}/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3/\text{NdGaO}_3$ угол между \mathbf{H} и направлением V^{SP} фиксировался на значении $\pi/2$, что обеспечивало максимальную эффективность V^{SP} и в то же время отсутствие дополнительных напряжений, вызванных анизотропным магнитосопротивлением [18]. Экспериментально это доказано анализом соответствующей угловой зависимости. Типичные сигналы $V^{\text{SP}}(\mathbf{H})$, полученные при $T = 300$ К, показаны на рисунке 8 вместе с линией ФМР, зарегистрированной в тех же условиях. Обратите внимание, что форма $V^{\text{SP}}(\mathbf{H})$ хорошо согласуется с кривой Лоренца.

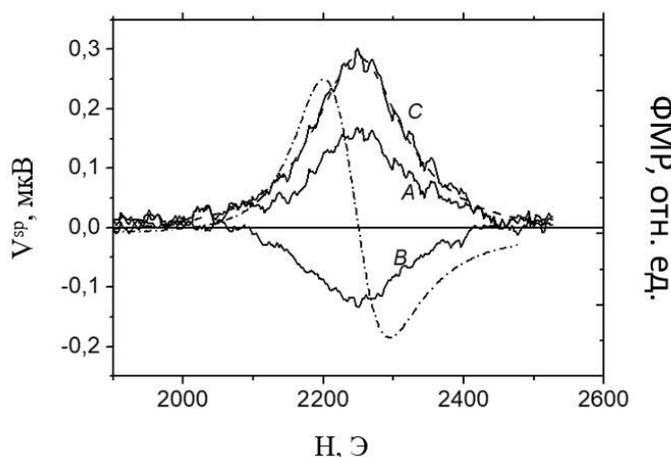


Рисунок 8. Левая шкала, сплошные кривые: сигналы спиновой накачки $V^{\text{SP}}(\mathbf{H})$, зарегистрированные при $T = 300$ К при противоположных направлениях магнитного поля (А, В), и их разность (С); пунктирная линия: подгонка Лоренцевой линией. Правая шкала, штрих пунктирная кривая: линия ФМР.

Эксперименты проводились с эпитаксиальными пленочными гетероструктурами $\text{Pt}(10 \text{ нм})/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3(45 \text{ нм})$, изготовленными методом магнетронного напыления на монокристаллической подложке $(110)\text{NdGaO}_3$. Магнитные параметры образцов в интервале температур 100 – 340 К определяли путем анализа спектров ФМР, зарегистрированных на ЭПР-спектрометре. Угловые зависимости положения линии ФМР регистрировались

при вращении постоянного магнитного поля H в плоскости пленки. По этим данным можно определить значение M_0 , а также параметры кубической и одноосной магнитной анизотропии, характерные для эпитаксиальных пленок $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ на такой подложке.

В последней части главы приведена температурная зависимость электрического тока, вызванного спиновым током для гетероструктур $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ и $\text{Pt}/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$.

В результате, при учете факторов, не относящихся к генерации спинового тока, получились зависимости, показанные на рисунке 9. Исходя из температурных зависимостей напряжения, вызванного спиновым током, можно сделать вывод о том, что, предполагая одинаковое СВЧ воздействие на ферромагнетик, величина спинового тока в обеих гетероструктурах имеет одинаковый порядок.

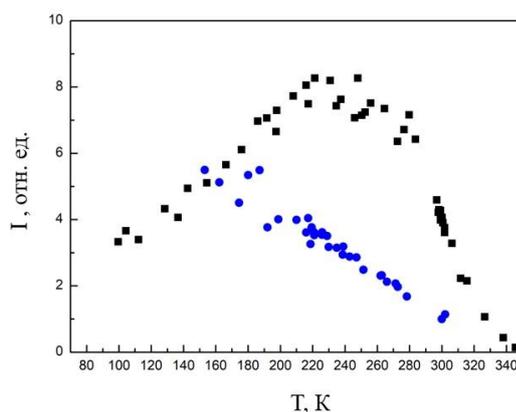


Рисунок 9. Температурная зависимость электрического тока, вызванного спиновым током при частоте 9.2 ГГц для $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ -синие круги, $\text{Pt}/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ -черные квадраты.

В заключении представлены основные выводы работы, которые заключаются в следующем:

1. Показано, что разработанная методика роста эпитаксиальных пленок $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ нанометровой толщины на подложках $(110)\text{NdGaO}_3$ с помощью высокочастотного магнетронного распыления позволяет получить линию ферромагнитного резонанса с шириной спектра 14 Э, что соответствует мировому уровню. Технологические параметры режима напыления пленок являются следующими: $T=800$ °С, давление в режиме напыления 0.5 мбар,

давление откачки $3 \cdot 10^{-7}$ мбар, соотношение $\text{Ar}/\text{O}_2=1/3$, давление кислорода при отжиге 1 атмосфера.

2. Обнаружено и подтверждено протекание спинового тока в гетероструктуре $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$, на частотах 9.6 ГГц и 2.6 ГГц в режиме ферромагнитного резонанса.

3. Обнаружено и подтверждено наличие высокопроводящего слоя на границе в структурах $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ и $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3/\text{SrIrO}_3$. Исследована температурная зависимость этих слоев.

4. Обнаружена и исследована немонотонная от толщины зависимость поля магнитной одноосной анизотропии для пленок $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$, в диапазоне толщин до 150 нм. Причина немонотонного поведения связана с изменением кристаллической решетки с увеличением толщины.

5. Обнаружено и исследовано ферромагнитное упорядочение слоя SrIrO_3 в гетероструктуре $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ при температуре 60 К. Возникновение ферромагнетизма в слое SrIrO_3 обусловлено переносом электронов от Ir к Mn. Возникающая при этом избыточная концентрация носителей заряда (электронов в манганите и дырок в иридате), превышающая определенную критическую величину, способствует возникновению ферромагнитного упорядочения в иридате.

6. Обнаружено и исследовано возникновение устойчивых резистивных состояний в эпитаксиальных пленках $\text{La}_{0.7}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$, выращенных на пьезоэлектрической подложке $(011)_{0.79}\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_{3-0.21}\text{PbTiO}_3$, которые можно переключать электрическим полем. Эффект обусловлен растяжением эпитаксиально выращенной пленки $\text{La}_{0.7}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$ пьезоэлектрической подложкой при разных напряженностях электрического поля.

Публикации автора по теме диссертации

Публикации автора в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК

1. Овсянников, Г.А. Влияние напряженности, вызванной подложкой, на проводимость ферромагнитных манганитных лантан-бариевых пленок / Г.А. Овсянников, Т.А. Шайхулов, В.А. Шахунов, В.В. Демидов, Н.В. Андреев, А.Е. Пестун, В.Л. Преображенский // Физика твердого тела. –2017. – Т. 59, №11. –С. 2178-2182.

2. Шайхулов, Т.А. Затухание спиновой прецессии в гетероструктурах манганит/нормальный металл / Т.А. Шайхулов, Г.А. Овсянников // Физика твердого тела. — 2018. — Т. 60, №11. — С. 2190-2195.

3. Овсянников, Г.А. Проводимость манганитных пленок под действием напряженности, вызванной деформацией подложки / Г.А. Овсянников, Т.А. Шайхулов, В.А. Шахунов, А.А. Климов, В.Л. Преображенский, N. Tiercelin, P. Pernod // Физика твердого тела. – 2019. –Т. 61, № 9. – С. 1712-1716.

4. Шайхулов, Т.А. Магнитные и резистивные свойства гетероструктур манганит/иридат / Т.А. Шайхулов, Г.А. Овсянников, В.В. Демидов, Н.В. Андреев // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2019. –Т.156, № 1. – С. 135-139.

5. Ацаркин, В. А. Влияние намагниченности на эффективность спиновой накачки в двухслойной структуре ферромагнетик-нормальный металл / В.А. Ацаркин, В.В. Демидов, Т.А. Шайхулов // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2020. – Т. 157, № 2. – С. 272-280.

6. Шайхулов, Т.А. Температурная зависимость напряжения, вызванного спиновым током в гетероструктуре манганит/иридат / Т.А. Шайхулов, К.Л. Станкевич, К.И. Константибян, В.В. Демидов, Г.А. Овсянников // Физика твердого тела. – 2021. – Т.63, № 9. – С. 1321-1324.

Публикации автора в журналах, входящих в Международные реферативные базы данных и системы цитирования Scopus и Web of Science

7. Shaikhulov T.A. Strain effect on resistivity of $\text{La}_{0.7}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$ thin film / T.A. Shaikhulov, V.A. Shakhunov, V.V. Demidov, G.A. Ovsyannikov, N.V. Andreev, A.E. Pestun, V.L. Preobrazhensky // EPJ Web of Conferences. – 2018. – V. 185. P. 06006-06010.

8. Atsarkin V. A. Temperature dependence of pure spin current and spin-mixing conductance in the ferromagnetic—normal metal structure / V.A. Atsarkin, I.V. Borisenko, V.V. Demidov, T.A. Shaikhulov // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2018. – V. 51. – P. 245002.

9. Shcaihulov T.A. Temperature dependence of Gilbert damping in manganite/normal metal heterostructures / T.A. Shcaihulov, V.V. Demidov, I.V. Borisenko, G.A. Ovsyannikov // EPJ Web of Conferences. –2018. – V. 185. – P. 02007.

10. Ovsyannikov G.A. Resistivity of Manganite Thin Film Under Strain / G.A. Ovsyannikov, T.A. Shaikhulov, V.A. Shakhunov, V.L. Preobrazhensky, T. Mathurin, N. Tiercelin, P. Pernod // Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. – 2019. – V. 32, №9. – P. 2759–2763.

11. Atsarkin, V.A. FMR line shape effect on spin pumping in bilayer structures / V.A. Atsarkin, V.V. Demidov, T.A. Shaikhulov, G.A. Ovsyannikov // Magnetic Resonance in Solids. –2019. – V. 21. – P.19302.

12. Shaikhulov T.A. Spin current and magnetic measurements in heterostructure SrIrO₃/La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ / T.A. Shaikhulov, V.V. Demidov, K.L. Stankevich, G.A. Ovsyannikov // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. –V. 1389, № 1. – P.1389.

13. Demidov V.V. Observation of ferromagnetism in a thin SrIrO₃ film contacting with a La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ film / V.V. Demidov, N.V. Andreev, T.A. Shaikhulov, G.A. Ovsyannikov // Journal of magnetism and magnetic material –2020. – V. 497. – P. 165979.

14. Ovsyannikov G.A. Magnetism at an iridate/manganite interface: Influence of strong spin-orbit interaction / G.A. Ovsyannikov, T.A. Shaikhulov, K.L. Stankevich, Yu. Khaydukov, N.V. Andreev // Phys. Rev. B. – 2020. – V. 102, № 14. – P. 144401.

15. Ovsyannikov G.A. Spin current and spin waves at a platinum/yttrium iron garnet interface: impact of microwave power and temperature / G.A. Ovsyannikov, K.Y. Constantinian, K.L. Stankevich, T.A. Shaikhulov, A.A. Klimov // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2021.–V.54, № 36. – P. 365002.

Публикации автора в трудах международных и российских конференций

16. Овсянников Г.А. Влияние напряженности, вызванной подложкой, на проводимость ферромагнитных манганитных тонких пленок / Г.А. Овсянников, Т.А. Шайхулов, В.А. Шахунов, В.В. Демидов, А.А. Климов, В.Л. Преображенский, N. Tiercelin, P. Pernod P. // Нанозифика и нанозлектроника XXI Международнй симпозиум. – Труды, 2017. –Т. 1. – С. 219-220.

17. Shaikhulov T.A. Strain effect of resistivity of manganite thin film / T.A. Shaikhulov, V.A. Shakhunov, V.V. Demidov, G.A. Ovsyannikov G, N.V. Andreev, A.E. Pestun, T.A. Sviridova, V.L. Preobrazhensky // Moscow International Symposium on Magnetism Moscow. – Book of abstracts, 2017. – P. 884.

18. Shcaihulov T.A. Temperature dependence of Gilbert damping in thin manganite/normal metal bilayers / T.A. Shcaihulov, V.V. Demidov, I.V. Borisenko, G.A. Ovsyannikov // Moscow International Symposium on Magnetism Moscow. – Book of abstracts, 2017.– P. 163.

19. Шайхулов Т.А. Затухание спиновой прецессии в гетеротструктурах манганит/нормальный металл / Т.А. Шайхулов, Г.А. Овсянников, В.В. Демидов // Нанозифика и нанозлектроника XXII Международнй симпозиум. – Труды, 2018. – Т. 1, с.279-280.

20. Шайхулов Т.А. Магнитные и резистивные свойства гетерострукту манганит/иридат / Т.А. Шайхулов, Г.А. Овсянников, В.В. Демидов, Н.В. Андреев // 38 совещание по физике низких температур. –тезисы докладов, 2018. – С. 86-87.

21. Овсянников Г.А. Проводимость эпитаксиальных манганитных пленок под действием напряженности, вызванной подложкой / Г.А. Овсянников, Т.А. Шайхулов, В.А. Шахунов,

А.А. Климов, В.Л. Преображенский, N. Tiercelin, P. Pernod // Нанозифика и нанозлектроника XXIII Международного симпозиума. – Труды, 2019. –Т. 1. – С. 258-259.

22. Овсянников Г.А. Магнитные взаимодействия на границе оксидный ферромагнетик.ферромагнитный интерметаллид. / Г.А. Овсянников, В.В. Демидов, Т.А. Шайхулов, А.А. Климов, N. Tiercelin, P. Pernod P, С.А. Никитов С.А // Нанозифика и нанозлектроника XXIII Международного симпозиума. –Труды, 2019. – Т. 1. –С. 256-257.

Список литературы

1. J. Sinova, S. O. Valenzuela, J. Wunderlich, Back C. H., Jungwirth T. Spin Hall effects//Rev. Mod. Phys. –2015. – Т. 87.– С. 1213-1259.
2. Liu L., Pai C.-F., Li Y., Tseng H. W., Ralph D. C., Buhrman R. A. Spin-Torque Switching with the Giant Spin Hall Effect of Tantalum// Science. –2012. – Т. 336, № 6081. – С. 555-558.
3. Kajiwara Y., Takahashi S., Ohe J., Uchida K., Mizuguchi M., Umezawa H., Kawai H., Ando K., Takanashi K., Maekawa S., Saitoh E. Transmission of electrical signals by spin-wave interconversion in a magnetic insulator // Nature. –2010. – Т. 464.– С. 262-266.
4. Lim W.L., Ebrahim-Zadeh N., Owens J.C., Hentschel H. G. E., Urazhdin S. Temperature-dependent proximity magnetism in Pt//Appl. Phys. Lett. T. –2013.– Т. 102, №16. – С. 162404.
5. Biswas A., Jeong Y. H., Growth and engineering of perovskite SrIrO₃ thin films // Current Applied Physics.–2017. – Т.17, № 5. – С. 605-614.
6. Bhowal S., Satpathy S. Emergent magnetism at the 3d-5d interface: SrMnO₃/SrIrO₃ // AIP Conference Proceedings. –2018. –Т. 2005, № 1. – С. 020007.
7. Wu Y., Matsushita Y., Suzuki Y. Nanoscale magnetic-domain structure in colossal magnetoresistance islands // Phys. Rev. B. –2001. – Т.64. – С. 220404(R).
8. Bakaul S. R., Lin W., Wu T. Evolution of magnetic bubble domains in manganite films //APL. –2011– Т.82, № 99. – С. 042503-.
9. Vasilevskaya T. M., Sementsov D. I. Resonance properties of magnetically anisotropic films with various anisotropy dispersion //The Physics of Metals and Metallography. –2009. – Т.108, № 4. – С. 339-344.
10. Da Lan, Ping fan Chen, Chao Liu, Xiao han Wu, Ping Yang, Xiaojiang Yu, Jun Ding, Jingsheng Chen and Gan Moog Chow. Interfacial control of domain structure and magnetic anisotropy in La_{0.67}Sr_{0.33}MnO₃ manganite heterostructures //PRB. –2021. – Т.104.– С. 125423.
11. Lu Y., Klein J., Hofener C., Wiedenhorst B., Philipp J.B., Herbstritt F., Marx A., Alff L., Gross R. Magnetoresistance of coherently strained La_{2/3}Ba_{1/3}MnO₃/SrTiO₃ superlattices // Phys. Rev. B. – 2000. –Т. 62, № 23. – С. 15806.
12. Iurchuk V., Doudin B., Kundys B., Multistate D. Multistate nonvolatile straintronics controlled by a lateral electric field // J. Phys.: Condens. Matter. –2014. –Т. 26. –С. 292202.

13. Демин Р.В., Королева Л.И., Муминов А.З., Муковский Я.М. Гигантская объемная магнитострикция и колоссальное магнитосопротивление при комнатных температурах в $\text{La}_{0.7}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$ // ФТТ. –2006. –Т. 48, № 2. – С. 305-308.
14. Nan T.X., Zhou Z.Y., Lou J., Liu M., Yang X., Gao Y., Rand S., Sun N.X. Voltage impulse induced bistable magnetization switching in multiferroic heterostructures // Appl. Phys. Lett. –2012. –Т. 100, № 13. – С. 132409
15. Wu T., Zhao P., Bao M., Bur A., Hockel J.L., Wong K., Mohanchandra K.P., Lynch C.S., Carman G.P. Domain engineered switchable strain states in ferroelectric (011) $[\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3]_{(1-x)}\text{-}[\text{PbTiO}_3]_x$ (PMN-PT, $x \approx 0.32$) single crystals // J. Appl. Phys. –2011. – Т. 109 № 12. – С. 124101.
16. Thiel S., Hammer G., Schmehl A., Schneider C.W., Mannhart J. Tunable Quasi-Two-Dimensional Electron Gases in Oxide Heterostructures // Science. –2006. – Т.313, № 5795 –С. 1942-1945.
17. Bhowal S., Satpathy S., Emergent magnetism at the 3d-5d interface: $\text{SrMnO}_3/\text{SrIrO}_3$ // AIP Conference Proceedings. – 2005. – Т. 2005, №1. – С. 020007.
18. Atsarkin V. A., Sorokin B. V., Borisenko I. V., Demidov V. V., Ovsyannikov G. A. Resonance spin-charge phenomena and mechanism of magnetoresistance anisotropy in manganite/metal bilayer structures // J. Phys. D–2016. –№ 49. – С. 125003.