

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по образовательной деятельности
ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский)
федеральный университет», доцент


_____ Турилова Е.А.
«28» окт 2024



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Шайхулова Тимура Айратовича
«СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ
ПЛЕНОК МАНГАНИТА ЛАНТАНА И ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ИХ
ОСНОВЕ»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного
состояния»

Тонкоплёночные структуры, включающие слои ферромагнитных и нормальных металлов, лежат в основе такого современного направления, как спинтроника. В том числе, интерес привлекают гетероструктуры, в которых ферромагнитные (ФМ) слои представлены оксидами переходных 3d металлов, а слои нормального металла (НМ) характеризуются сильным спин-орбитальным взаимодействием. К магнитным проводящим оксидам относятся достаточно давно известные соединения – манганиты лантана-стронция и лантана-бария, которые исследовались ранее в связи с обнаруженным в них эффектом колоссального магнитосопротивления. Проводящие слои с сильным спин-орбитальным взаимодействием в подавляющем числе работ представлены тяжелыми металлами – платиной, вольфрамом, танталом, где последние два особенно интересны в метастабильной β -фазе. Другой вариант проводящего НМ-слоя – оксиды, содержащие ионы 5d переходных металлов. Повышенное внимание к исследованиям таких структур обусловлено широким разнообразием физических явлений, возникающих при контакте ФМ и НМ слоев. Часть из этих явлений претендуют на практическое применение, в частности, в

этих явлений претендуют на практическое применение, в частности, в элементах памяти. Так, появляется все большее количество работ, в которых описывается возможность переключения направления намагниченности ФМ-слоя, как легкоплоскостного, так и легкоосного с перпендикулярной магнитной анизотропией, не задействуя магнитное поле, а используя спиновые эффекты Холла. Последние состоят во взаимном преобразовании зарядовых и спиновых токов в проводящих слоях с сильным спин-орбитальным взаимодействием. В свою очередь, привлекательной особенностью магниторезистивной памяти является ее энергонезависимость, что выгодно отличает ее от классической динамической памяти. Диссертационная работа Шайхулова Т.А. посвящена отработке методик синтеза неклассических эпитаксиальных слоев проводящих оксидных соединений – манганитов и иридатов, и гетероструктур типа ФМ/НМ на их основе, а также исследованию спин-зарядового преобразования в двухслойных объектах. Расширение номенклатуры соединений, пригодных для использования в спинтронных структурах, и демонстрация их функциональности и технологичности изготовления, безусловно, являются **актуальными** научными и научно-технологическими задачами.

Диссертационная работа Шайхулова Т.А. посвящена синтезу и исследованию свойств эпитаксиальных пленок манганитов лантана с составами $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ и $\text{La}_{0.7}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$ и гетероструктур $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$, $\text{Pt}/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ на их основе. Особый интерес представляет изучение температурных зависимостей спектров ФМР и спиновой динамики, которое дает возможность обнаружения новых фазовых состояний, индуцированных эффектами близости в двухслойных системах.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка используемой литературы.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, определены ее цель и задачи, которые требовалось решить. Отмечены научная новизна, практическая значимость, сформулированы положения, выносимые на защиту.

Первая глава носит обзорный характер. В ней в разделах 1.1 и 1.2 дан краткий обзор материалов, используемых в данной диссертации. В разделе 1.3 описана структура ферромагнитных доменов в пленках манганитов и представлен метод магнито-силовой микроскопии (МСМ), наиболее подходящий для визуализации и исследования доменной структуры в тонких пленках. В разделе 1.4 приведены теоретическое описание макроспиновой модели магнитной динамики и уравнение Ландау-Лифшица-Гильберта, используемые в основной части работы для интерпретации

экспериментальных данных. В разделе 1.5 описывается методика определения магнитных параметров пленок с использованием спектроскопии ферромагнитного резонанса. В разделах 1.6 и 1.7 описывается использованный в работе подход к генерации и детектированию спинового тока в тонкопленочных двухслойных структурах ферромагнетик/нормальный металл. В разделе 1.8 описываются примеры магнитных логических устройств на основе гетероструктур с ферромагнитными материалами.

Во второй главе в разделе 2.1 описываются методика синтеза 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 $\text{Pt}/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$, послужившие объектами исследований диссертации. Приведены рентгеновские дифрактограммы, как для отдельных пленок, так и для гетероструктур. В разделе 2.2 представлены результаты по эволюции доменной структуры пленок $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ при вариации их толщины. В разделе 2.3 приведена зависимость намагниченности тонких пленок $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ от толщины.

В третьей главе в разделе 3.1 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. В разделе 3.2 описан метод проведения эксперимента. В разделе 3.3 обсуждаются результаты измерения проводимости $\text{La}_{0.7}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$ пленок под действием напряженности, вызванной деформацией подложки.

В четвертой главе в разделе 4.1 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. В разделе 4.2 приведены температурные зависимости сопротивления граничного слоя 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 $\text{Pt}/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$. В разделах 4.3-4.5 приведены результаты исследований гетероструктуры $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ методом ферромагнитного резонанса. В разделе 4.5 приведен результат, полученный в данной работе, а именно 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.

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 разделе 5.1 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 в разделе 5.2 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 заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

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

1. Предложена замена классического слоя платины на эпитаксиально выращенную в одном цикле с $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ пленку SrIrO_3 в гетероструктуре $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$, проявляющей спиновый эффект Холла. Этим продемонстрирована возможность эффективного спин-зарядового преобразования в чисто оксидной структуре.

2. Исследованы характеристики проводимости граничного слоя, образующегося на интерфейсе слоя с сильным спин орбитальным взаимодействием SrIrO_3 и ферромагнитного металла $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$.

3. 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 и предложена гипотеза его возникновения.

Достоверность выносимых на защиту положений и представленных результатов обеспечивается применением хорошо отработанных традиционных методик проведения эксперимента в совокупности с обоснованным подходом к анализу данных. Результаты исследований докладывались на профильных российских и международных конференциях, а основные результаты диссертации опубликованы в 22 научных работах.

Научная и практическая значимость работы определяются тем, что 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. Обнаруженная в рамках настоящей работы зависимость сопротивления пленки $\text{La}_{0.7}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$, выращенной на пьезоэлектрической подложке $\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ (PMN-PT), могут быть использованы при создании логических элементов и элементов памяти в стрейнтронных устройствах.

По результатам диссертационного исследования 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 работ – в трудах международных и российских конференций.

Основное содержание и тема диссертации **соответствуют специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния** (п.1 – Теоретическое и экспериментальное изучение физической природы и свойств неорганических и органических соединений как в кристаллическом (моно- и поликристаллы), так и в аморфном состоянии, в том числе композитов и гетероструктур, в зависимости от их химического, изотопного состава, температуры и давления.»; п.6 – Разработка экспериментальных методов изучения физических свойств и создание физических основ промышленной технологии получения материалов с определенными свойствами).

В работе следует отметить следующие **недостатки**:

1. В формулировке первого защищаемого положения, на наш взгляд, требуется четкое обозначение направления генерируемого в условиях ферромагнитного резонанса (спиновой накачки) спинового тока по отношению к гетероструктуре.
2. Насколько обоснованным и физичным, на взгляд автора, является использование такой макроскопической характеристики, как объемное удельное сопротивление, для описания свойств граничного (интерфейсного) слоя в гетероструктурах SrIrO_3 и $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ во втором защищаемом положении и разделе 4.2?
3. В формулировке третьего защищаемого положения не указывается явно, зависимости поля одноосной магнитной анизотропии *от какой величины* имеют немонотонный характер.
4. Диссертация содержит довольно большое количество рентгеновских дифрактограмм синтезированных эпитаксиальных структур, однако ни в главе 1 (стр. 1-17), ни в главе 2 (стр. 42-43) не приведена необходимая для понимания представленных данных информация о симметрии и величине постоянной (постоянных) кристаллической решетки объемных равновесных манганита $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ и подложки NdGaO_3 .
5. При обсуждении магнитной доменной структуры тонких пленок $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ и ее эволюции с изменением толщины (стр. 45-47) сильно не хватает данных по магнитным свойствам этих пленок: ферромагнитны они или нет, какова форма кривых перемагничивания и какова магнитная анизотропия. Без принятия таких данных в рассмотрение трактовка результатов по магнитно-силовой микроскопии (МСМ) не представляется однозначной, поскольку вся информация, доступная для МСМ – это контраст в величине перпендикулярной компоненты намагниченности.

6. В разделе 2.3 (стр. 47) автором представлены зависимости констант одноосной и кубической магнитной анизотропии пленок $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ от их толщины. Однако, на наш взгляд, недостаточно подробно описано, как эти величины были получены: не приведены спектры ФМР, их ориентационные зависимости с соответствующими аппроксимациями. Читателю предлагается принять на веру эти величины, что для экспериментаторов непривычно и затруднительно.
7. Обозначение кристаллографического направления [100] на панелях а и б рисунка 20 неверно, должно быть [001].
8. На рисунке 21 отсутствуют значения величин приложенного электрического поля для трех кривых, а в подписи отсутствует соотнесение с цветами кривых.
9. Отсылки к панелям а-в рисунка 22 в тексте на стр. 59 не согласуются с данными, представленными на рисунке.
10. На рисунке 35 (стр. 76) по оси абсцисс вместо ожидаемого магнитного поля показана температура.

Отмеченные недостатки при этом не влияют существенно на общее положительное впечатление от диссертации.

Автореферат соответствует требованиям, предусмотренным п. 25 «Положения о присуждении ученых степеней». Его содержание полностью отражает содержание диссертации, полученные результаты и выводы.

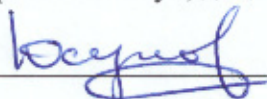
В завершение констатируем, что диссертация Шайхулова Т.А. представляет собой законченное научное исследование и по объему результатов, достоверности, научной и практической значимости выводов удовлетворяет п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением правительства РФ № 842 от 24.09.2013, а ее автор, Шайхулов Тимур Айратович, заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Отзыв составлен по результатам обсуждения диссертационной работы Шайхулова Т.А. на заседании кафедры квантовой электроники и радиоспектроскопии Казанского федерального университета, протокол №2 от 11 сентября 2024 г.

Отзыв составил:

Ведущий научный сотрудник, заведующий кафедрой квантовой электроники и радиоспектроскопии Института физики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего

образования "Казанский (Приволжский) федеральный университет",
тел. +7 (917) 394-21-92,
адрес: 420008 Казань, ул. Кремлевская 18
e-mail: Roman.Yusupov@kpfu.ru
канд. физ.-мат. наук, доцент



Юсупов Роман Валерьевич

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Казанский (Приволжский) федеральный университет", 420008, Россия, РТ, г. Казань, ул. Кремлевская, д.18.
Телефон: +7 (843) 233-71-09.
E-mail: public.mail@kpfu.ru