

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Шайхулова Тимура Айратовича

«Создание и исследование эпитаксиальных пленок манганита и гетероструктур на их основе для разработки новых элементов спинтроники»
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.8. – Физика конденсированного состояния.

Актуальность работы

Исследования многослойные плёночные структуры, состоящие из чередующихся слоев ферромагнитных и нормальных металлов в настоящее время является перспективным направлением, в связи с активно развивающимися новыми отраслями электроники – магноники и спинтроники, в основе которых лежат магнитные свойства веществ. Так в устройствах на принципах спинтроники, энергию и информацию переносит не электрический ток, а ток спинов, а в устройствах магноники – магныны – квазичастицы спиновой волны. Для создания устройств на принципах спинтроники требуется широкая фундаментальная база, в первую очередь, касающаяся новых материалов для создания устройств. Такими материалами могут служить слоистые плёночные структуры типа SrIrO_3 / $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$, $\text{Pt/La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$, $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$, $\text{La}_{0.7}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$, благодаря их уникальным физическим свойствам, возникающим при контакте ФМ и НМ слоев. 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, магнитного эффекта близости и др.

Характеристика содержания работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка используемой литературы. Общий объем исследования составляет 106 страниц, и содержит 38 рисунков. Список литературы содержит 154 наименований.

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. Дан краткий обзор материалов, используемых в данной диссертации, описана структура ферромагнитных доменов в пленках манганитов, приведены теоретические описания макроспиновой модели магнитной динамики и уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта, приводится методика генерации и детектирования спинового тока в двухслойках ферромагнетик/нормальный металл, описываются примеры магнитных логических устройств на основе гетероструктур с ферромагнитными материалами.

В главе 2 описывается получение и магнитные свойства тонких пленок манганитов. Описывается процесс создания эпитаксиальных тонких пленок SrIrO_3 , $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ и гетероструктур $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ и $\text{Pt}/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$, на установке высокочастотного магнетронного распыления. Приведены рентгеновские дифрактограммы. Обнаружено возникновение магнитных доменов с намагниченностью, направленной перпендикулярно плоскости пленки для толщин пленок более 75 нм. При увеличении толщины до 147 нм форма доменов становится лабиринтной.

В главе 3 исследуется проводимость манганитных пленок под действием напряженности, вызванной деформацией подложки. Приведены измерения зависимости сопротивления пленок $\text{La}_{0.7}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$ от напряжения, поданного на пьезоэлектрическую подложку. 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 напряженности поля вблизи поля, равного корэцитивной силы.

В главе 4 исследуются магнитные и резистивные параметры гетероструктур. Исследуется проводимость границы, возникающей 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 $\text{Pt}/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$. Выявлено малое значение удельного сопротивления границы, что указывает на возможность существования двумерного электронного газа с высокой подвижностью. Обнаружено 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.

Глава 5 посвящена спиновому току в гетероструктурах на основе манганитов $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$, $\text{Pt}/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$. Учитывается постоянное напряжение,

возникающее из-за наличия анизотропного магнитосопротивления в FM-слое. Представлены результаты температурной зависимости спинового тока. Исходя из анализа зависимостей был сделан вывод о том, что с понижением температуры амплитуда напряжения вызванного, спиновым током в гетероструктуре $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ в диапазоне 300 К-130 К монотонно растет.

Основные результаты и выводы работы сформулированы в заключении.

Наиболее важными результатами на мой взгляд являются следующие.

1. Оптимизирована методика получения эпитаксиальных пленок нанометровой толщины $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ и пленок SrIrO_3 на подложках $(110)\text{NdGaO}_3$ методом высокочастотного магнетронного распыления. Был проведен рост более 100 пленок $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$, SrIrO_3 и гетероструктур на их основе.
2. Исследована проводимость границы между слоем с сильным спин-орбитальным взаимодействием SrIrO_3 и ферромагнитным слоем $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$, а так же между платиной (Pt) и $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$. Обнаружен переходной слой с высокой проводимостью на границе.
3. Предложена замена платины для регистрации обратного спинового эффекта Холла в $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$, на эпитаксиально выращенную в одном цикле с $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ пленку SrIrO_3 .
4. Исследовано изменение доменной структуры от толщины пленках $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$, выращенных на подложках NdGaO_3 .
5. Обнаружен и зарегистрирован спиновый ток в гетероструктурах $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$

Научные результаты являются актуальными и оригинальными, достоверность выводов не вызывает сомнений. Работа имеет существенное прикладное значение для спинтроники и физики конденсированного состояния в целом. Полученные в работе научные результаты могут быть в дальнейшем использованы при разработке и конструировании элементной базы современной спинтроники на основе исследованных наноструктур. Обнаруженная 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.

Основные замечаний по работе

В качестве замечаний по диссертационной работе отмечу следующее.

1. Из рис 36 видно, что зависимость тока от температуры для структуры Pt/La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ имеет максимум, в то время как зависимость для структуры SrIrO₃/La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ имеет монотонный характер. Хотелось бы получить комментарии автора, с чем это связано.
2. На рис. 35 приводятся температурные зависимости тока и напряжения для частоты 2,6 ГГц. Однако, следует ожидать то, что данная зависимость может изменяться при изменении частоты сигнала. Хотелось бы, чтобы автор прокомментировал данный момент.
2. С каким физическим механизмом связано то, что сопротивление пленки La_{0.7}Va_{0.3}MnO₃ для направления протекания тока [011] оказывается больше, чем для направления протекания тока [100] (рис. 19)?
4. Из рис. 20 видно, что для направления протекания тока [100] пик деформации уже, чем пик сопротивления. С какими процессами это может быть связано?
5. Описание рис. 36 не соответствует данным на рис 36. В частности написано, “Амплитуда напряжения, ... в Pt/La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃начиная с температуры 200 К, тоже монотонно растет “. Однако, из рис 36 видно, что для Pt/La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ температура растет начиная с 340 К до 240 К, а затем уменьшается.
6. Подпись по вертикальной оси на рис. 31 FMR не является физически измеряемой величиной.
7. Подпись по рис. 35 “Спектр спинового тока снимаемый при комнатной температуре ...” не соответствует действительности, на рисунке изображена температурная зависимость напряжения.

Указанные замечания не снижают значимости полученных в диссертационной работе результатов и могут послужить основой для проведения будущих исследований.

Актуальность работы подтверждается высоким уровнем публикаций в авторитетных высокорейтинговых зарубежных изданиях квартиля Q1 и Q2, в

частности . Phys.Rev. B. , J. Phys. D: Appl. Phys. , JMMM. Всего по материалам диссертации опубликовано 15 статей из Перечня Высшей аттестационной комиссии, а также индексируемых в международных наукометрических базах Scopus и Web of Science.

В целом диссертационная работа представляет собой серьезное объемное и завершённое научное исследование, выполненное на высоком научном уровне. Работу можно квалифицировать, как решение крупной фундаментально-научной задачи создания и исследование эпитаксиальных пленок манганита и гетероструктур на их основе. Диссертация написана хорошим языком, аккуратно оформлена и проиллюстрирована, все результаты в работе излагаются достаточно подробно. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

С учетом вышесказанного считаю, что диссертационная работа Шайхулова Тимура Айратовича вносит существенный вклад в развитие современной радиофизики. Работа удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям согласно пп. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждения ученых степеней» (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 г.), а её автор **Шайхулов Тимур Айратович** заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. – Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент

Д.ф.-м.н., профессор кафедры нелинейной физики
ФГБОУ ВО «Саратовский национальный
исследовательский государственный университет
имени Н.Г. Чернышевского»

Морозова М.А.

Подпись Морозовой М.А.
заверяю:

Ученый секретарь СГУ
доцент

15.10.2024

Морозова Мария Александровна (специальность 1.3.4 - Радиофизика)
Адрес: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, корп. 8. Институт физики
Тел. +7 (8452) 51-69-47
Эл. почта: mamorozovama@yandex.ru



Семенова В.Г.