

На правах рукописи



Цикалов Виталий Сергеевич

**МАГНИТНЫЕ ТУННЕЛЬНЫЕ ПЕРЕХОДЫ  
НА ОСНОВЕ МАНГАНИТОВ:  
МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЕ,  
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ,  
СВЧ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ**

Специальность 01.04.11 – физика магнитных явлений

**Автореферат**

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Красноярск 2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институт физики им. Л. В. Киренского Сибирского отделения РАН

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук  
**Волков Никита Валентинович**

**Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук  
**Пудонин Федор Алексеевич**  
кандидат физико-математических наук  
**Великанов Дмитрий Анатольевич**

**Ведущая организация:** Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Защита состоится 5 марта 2012 г. в 14:30 на заседании диссертационного совета Д 003.055.02 при Учреждении Российской академии наук Институт физики им. Л. В. Киренского Сибирского отделения РАН по адресу: 660036, г. Красноярск, Академгородок 50, стр. 38, ИФ СО РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФ СО РАН.

Автореферат разослан 25 января 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор физико-математических наук



Втюрин А. Н.

**Актуальность темы.** Исследования последних лет показали, что наличие спиновых степеней свободы у носителей заряда проявляется наиболее ярко и порой неожиданным образом, прежде всего, в наноразмерных магнитных и гибридных структурах. Изучение отклика таких систем на протекание спин-поляризованного тока принесли в последние годы много интересных научных результатов и неожиданных сюрпризов, которые сделали весьма привлекательной идею использования спина электрона в качестве активного элемента для хранения, обработки и передачи информации[1,2]. Сформировалось даже целое самостоятельное направление в физике конденсированного состояния – спинтроника. Спинтроника – это мульти-дисциплинарная область науки и техники, центральной темой которой является явление спин-зависимого электронного транспорта в твердых телах и низкоммерных структурах. Этот раздел охватывает и интереснейшие фундаментальные вопросы спин-зависимых явлений, и прикладные вопросы, связанные с созданием принципиально новых электронных устройств, построенных на возможности манипулировать спиновыми степенями свободы.

Понятно, что сфера спинтроники весьма обширна, но есть все основания говорить, что на сегодняшний день в сфере внимания исследователей находятся, главным образом, два уникальных явления. Во-первых, это магниторезистивный эффект в многослойных магнитных структурах и, во-вторых, появление вращающего момента, действующего со стороны спинового тока на локальные магнитные моменты в наноструктурах[3]. В первом случае, магнитное поле используется для управления магнитным состоянием многослойной наноструктуры, позволяя тем самым управлять поляризованным током через нее. Во втором случае, появляется возможность манипулировать магнитным состоянием наноструктуры, используя поляризованный по спине транспортный ток. Более того, эффект переноса спина может вызвать прецессию намагниченности наноразмерного ферромагнетика с частотами, лежащими в СВЧ диапазоне[4]. Такая прецессия служит источником излучения электромагнитных СВЧ волн, частотой которых можно управлять и при помощи тока, и при помощи магнитного поля. По сути, можно вести речь о возможности создания генераторов СВЧ диапазона, работающих на абсолютно новых принципах.

Механизм переноса спина оказывается ответственным и за обратный эффект – генерацию постоянного напряжения на магнитном туннельном переходе при воздействии электромагнитного СВЧ излучения[5]. И опять речь идет о принципиально новом механизме, на этот раз детектирования, в основе которого взаимосвязь спиновой динамики и поляризованного тока в магнитных наноструктурах.

В полной мере все разнообразие спин-зависимых физических эффектов можно наблюдать в магнитных туннельных структурах. Не случайно считается, что исследования в области туннельного магнитосопротивления и магнитных туннельных контактов в целом стали важным этапом развития спинтроники, и интерес к спин-поляризованному транспорту через туннельные структуры только продолжает расти. Именно физическим процессам, имеющим место при протекании тока через магнитные туннельные структуры, посвящена эта работа. Мы остановили свой выбор на магнитных туннельных структурах на основе манганитов. Причины такого выбора следующие. Это, прежде всего, высокая спиновая поляризация электронов проводимости для выделенного семейства манганитов. Кроме того, это относительно высокая температура перехода в ферромагнитное состояние. И, наконец, это достаточно хорошо отработанная технология контролируемого получения тонких пленок этих материалов, в том числе и в составе многослойных структур. На основе экспериментальных и теоретических исследований мы попытаемся проанализировать и оценить преимущества и недостатки использования манганитов в туннельных структурах для решения различных задач спинтроники.

**Цель работы.** Цель настоящей работы заключается в изучении явлений спин-поляризованного электронного транспорта в системах с магнитными туннельными контактами на основе манганитов. Можно выделить две главные задачи, которые решались при проведении исследований:

1. Исследовать явления спин-зависимого электронного транспорта в магнитной туннельной структуре на основе материала манганита с использованием планарной геометрии, когда ток течет вдоль интерфейсов структуры (геометрия «ток в плоскости структуры»).
2. Провести изучение отклика кооперативной системы магнитных туннельных контактов гранулированного манганита на воздействие СВЧ излучения в комбинации с действием статического магнитного поля и постоянного тока.

#### **Научная новизна.**

1. Впервые проведено исследование магнитной туннельной структуры ферромагнитный металл/диэлектрик/ферромагнитный металл (LSMO/LSM<sub>1-δ</sub>O/MnSi/SiO<sub>2</sub>) в геометрии «ток в плоскости». Показано, что особенности транспортных свойств определяются эффектом переключения токовых каналов между слоями структуры. Эффект переключения управляется током смещения через структуру и магнитным полем. Установлено, что механизм влияния магнитного поля – зависимость сопротивления туннельных переходов под токовыми контактами от взаимной ориентации намагниченностей ферромагнитных электродов. Управляемое магнитным полем переключение токовых контактов определяет эффект положительного магнитосопротивления. Величина магнитосопротивления зависит от тока смещения. В отличие от стандартной

ситуации, когда смещение подавляет туннельный магниторезистивный эффект, в данном случае смещение приводит к увеличению магнито-сопротивления.

2. Впервые обнаружен и исследован фотоэлектрический эффект в магнитной туннельной структуре LSMO/LSM<sub>1-δ</sub>O/MnSi/SiO<sub>2</sub>. Эффект обусловлен генерацией электрон-дырочных пар при межзонном поглощении света в диэлектрическом слое туннельной структуры.
3. Впервые обнаружен эффект СВЧ детектирования, управляемый магнитным полем в поликристаллическом образце La<sub>0.7</sub>Ca<sub>0.3</sub>MnO<sub>3</sub>, представляющим собой кооперативную систему магнитных туннельных контактов. Проведено исследование эффекта в зависимости от температуры, тока смещения, мощности СВЧ излучения.
4. Предложена модель, объясняющая магнито-зависимый вклад в детектируемое напряжение и поведение этого вклада в зависимости от температуры, тока смещения и мощности СВЧ излучения. В основе модели взаимосвязь спин-поляризованного тока через магнитные туннельные контакты и спиновой динамикой, индуцированной в ферромагнитных гранулах, формирующих магнитные туннельные контакты в образце.

**Практическая значимость.** Результаты проведенных исследований позволяют получить дополнительную информацию о процессах, имеющих место в туннельных структурах при протекании спин-поляризованного тока, открыть новые возможности контроля спинового состояния носителей заряда и активного управления ими.

Это может найти применение в получении новых многофункциональных материалов и структур, перспективных для создания устройств микроэлектроники, работающих на новых принципах. Следует отметить, что по результатам исследований, выполненных в данной работе, был получен патент РФ «Магнитоуправляемый детектор СВЧ излучения».

**Достоверность результатов** обеспечивается комплексным характером выполненных исследований, их многократной повторяемостью, непротиворечивостью результатов, полученных различными методами.

#### **Защищаемые положения.**

1. Результаты исследования транспортных, магнитотранспортных и оптических свойств магнитной туннельной структуры LSMO/LSM<sub>1-δ</sub>O/MnSi/SiO<sub>2</sub> в геометрии ток в плоскости. Выявление механизмов, ответственных за эффект переключения токовых каналов магнитным полем, током смещения и оптическим облучением.
2. Исследование эффекта СВЧ детектирования, управляемого магнитным полем в поликристаллическом образце La<sub>0.7</sub>Ca<sub>0.3</sub>MnO<sub>3</sub> в зависимости от

температуры, тока смещения и мощности СВЧ излучения. Построение модели, объясняющей магнито-зависимый вклад в детектируемое напряжение.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались на: Евразийском симпозиуме по магнетизму «Magnetism on Nanoscale» (EASTMAG), 2007, Казань; на 8-м международном семинаре: «Radiation Damage Physics of Metal and Alloys», 2009 Снежинск; на 11-ом международном симпозиуме «Порядок, Беспорядок и Свойства Оксидов», 2008, Ростов-на-Дону; на 13-ом международном симпозиуме «Нанопизика и наноэлектроника», Нижний Новгород, 2009; на Московском международном симпозиуме по магнетизму (MISM), 2008, Москва.

**Структура диссертации.** Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Диссертация изложена на 111-х страницах машинописного текста, включая 32 рисунка. Библиографический список содержит 92 наименования.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** дано обоснование актуальности темы, сформулированы задачи и цели исследований. Приведены положения, выносимые на защиту, отражены их научная новизна и практическая ценность.

**Первая глава** является обзорной. В ней приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований спин-поляризованного электронного транспорта в магнитных туннельных переходах на основе манганитов. Рассматриваются как одиночные в планарном исполнении, так и кооперативные системы в гранулярном исполнении магнитных туннельных контактов. Кроме того рассматриваются некоторые аспекты спиновой динамики, а именно детектирующие свойства магнитного туннельного перехода на основе манганитов.

**Во второй главе** приведены экспериментальные методы исследования туннельных структур.

Для исследования транспортных и магнитных свойств материалов и структур была создана установка для прецизионных исследований. Процесс исследований на установке полностью автоматизирован. Основные характеристики установки: диапазон токов:  $\pm 1.05$  А; диапазон измеряемых напряжений:  $\pm 200$  В; диапазон температур: 4.2-300 К; диапазон магнитных полей:  $\pm 15$  кОе.

Для исследования детектирующих свойств образцов в СВЧ диапазоне создана универсальная установка со следующими характеристиками: диапазон токов:  $\pm 1.05$  А; диапазон температур: 4.2-300 К; диапазон магнитных полей:  $\pm 15$  кОе; частота, используемая в настоящей работе: 10 ГГц.

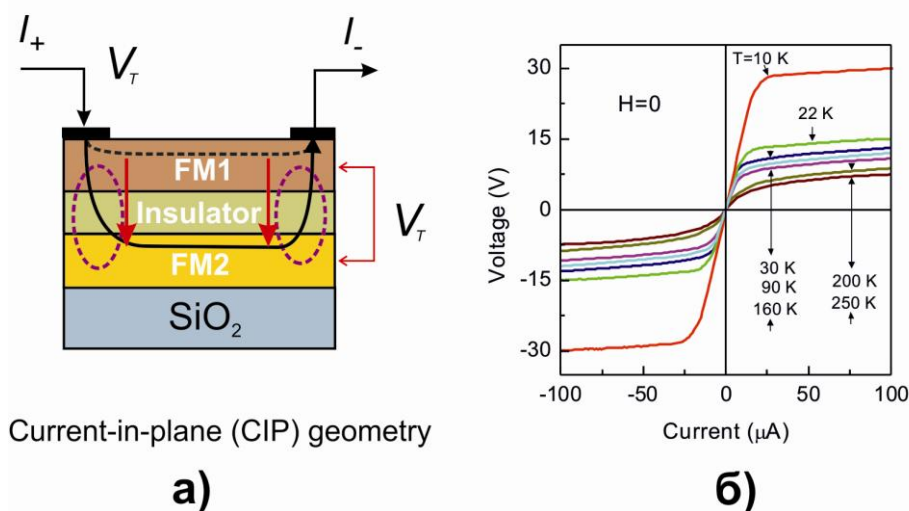
Также описаны методики приготовления двух типов туннельных магнитных систем. Первая система – это слоистая структура типа ферромагнитный металл/диэлектрик/ферромагнитный металл для исследования спин-зависимых транспортных свойств в геометрии «ток в плоскости» структуры. Образцы для исследования структуры ферромагнетик/диэлектрик/ферромагнетик синтезировались в Changwon National University, School of Nano & Advanced Materials Engineering, Changwon, Korea. В результате выбранного технологического процесса состав структуры оказывался следующим: нижний слой – моносилицид марганца (MnSi) с  $T_c=30$  К, который имеет металлический тип проводимости; верхний слой – пленка манганита с  $T_c=320$  К, которая имеет проводимость полупроводникового типа; на границе раздела – обедненный слой манганита с недостатком марганца, который является диэлектриком и немагнитным. Образующуюся структуру ниже 30 К можно представить как два ферромагнитных металла разделенные изолятором, т. е. магнитную туннельную структуру.

Вторая система – гранулированный ферромагнитный материал, представляющий собой кооперативный ансамбль магнитных туннельных контактов. Представлены основные принципиальные схемы для исследования проявлений спин-поляризованного транспорта в магнитных туннельных структурах. Поликристаллические образцы  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$  (LCMO) с гранулированной микроструктурой синтезировались в лаборатории Сильных магнитных полей ИФ СО РАН М.И. Петровым.

**В третьей главе** представлены результаты исследования эффекта управляемого переключения токовых контактов в магнитной структуре ферромагнитный металл/диэлектрик/ферромагнитный LSMO(100 nm)/ $\text{LSM}_{1-\delta}\text{O}$ (5 nm)/MnSi(10 nm) с использованием геометрии «ток в плоскости» структуры (Рис. 1а). На Рис. 1б приведены ВАХи структуры при разных температурах в отсутствии внешнего магнитного поля. При некотором критическом токе  $I_{th}$  наблюдается резкая нелинейность ВАХ.

Это можно объяснить следующим образом: поскольку токовые контакты нанесены на верхний проводящий слой (FM1), а нижний проводящий слой (FM2) отделен потенциальным барьером (Insulator), естественно предположить, что при малых токах  $I < I_{th}$  ток будет течь по верхнему электроду, и все транспортные свойства будут определяться свойствами верхней пленки. Увеличение тока  $I$  приводит к возникновению напряжения смещения  $V_T$  ( $V_T \ll V$ ) на туннельных переходах под токовыми контактами и связанного с ним увеличения туннельного тока  $I_T$  через потенциальный барьер, разделяющий верхний и нижний слои структуры. В результате при  $I > I_{th}$  ток начинает преимущественно течь по нижнему слою (MnSi), сопротивление которого  $R_S$  мало по сравнению с сопротивлением пленки манганита  $R_M$ .

Исследование ВАХ структуры в магнитном поле  $H$  показало, что при  $T > 30$  К влияние поля наблюдается только для токов  $I < I_{th}$ . Действие магнитного поля в этой области токов полностью определяется магниторезистивными свойствами пленки манганита. При увеличении тока смещения через структуру, когда он становится больше величины  $I_{th}$  ( $I > I_{th}$ ) происходит переключение токового канала, и ток начинает преимущественно течь по нижнему слою структуры. Поскольку MnSi не обладает заметной величиной магнитосопротивления, а ток через туннельные переходы при  $T > 30$  К не зависит от магнитного поля  $H$ , магниторезистивный эффект при  $I > I_{th}$  и температурах выше 30 К не наблюдается. При  $T < 30$  К в слое MnSi возникает ФМ порядок, и структура представляет собой уже магнитный туннельный переход, и ток через такой переход будет зависеть от взаимной ориентации намагниченностей  $M_M$  и  $M_S$  в слоях LSMO и MnSi, соответственно. Рис. 2а демонстрирует, что ниже 30 К эффект отрицательного магнитосопротивления для  $I < I_{th}$  сохраняется, но дополнительно обнаруживается сильное влияние  $H$  и на участке ВАХ, соответствующему  $I > I_{th}$ . Так, для  $T = 10$  К уже в поле 500 Э ВАХ становится практически линейной (Рис. 2б, 2в).

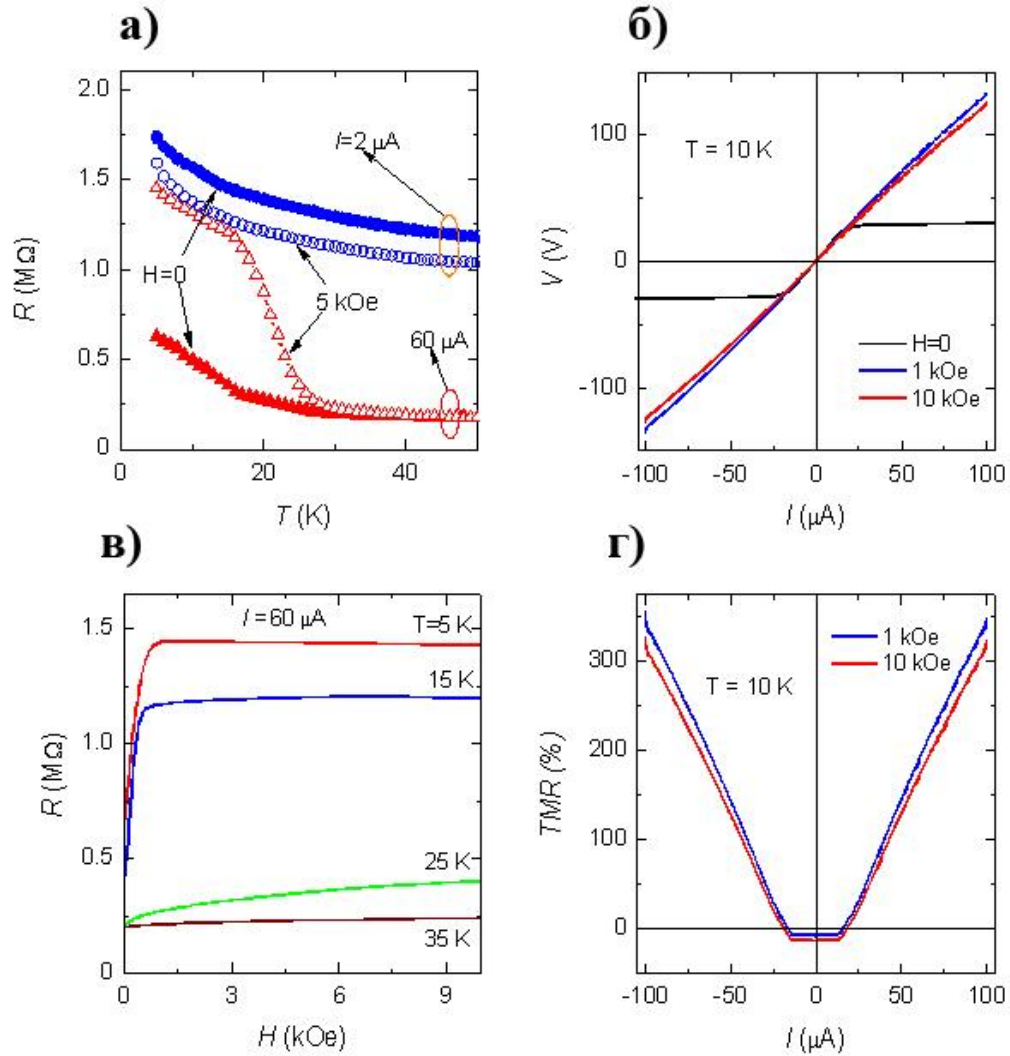


**Рис. 1** - а) Магнитная туннельная структура в геометрии «ток в плоскости» структуры (ТВП геометрия); б) Вольт-амперные характеристики туннельной структуры в геометрии ток в плоскости при разных температурах, без магнитного поля

Величина магнитосопротивления может достигать 350 %, и насыщения эффекта в описываемых экспериментах не наблюдалось (Рис. 2г). Эти результаты можно интерпретировать как обратное переключение токового канала из нижнего в верхний слой структуры за счет уменьшения туннельного тока в магнитном поле. Такое поведение магнитной туннельной структуры можно объяснить, предположив, что ферромагнетики в описываемом случае отно-



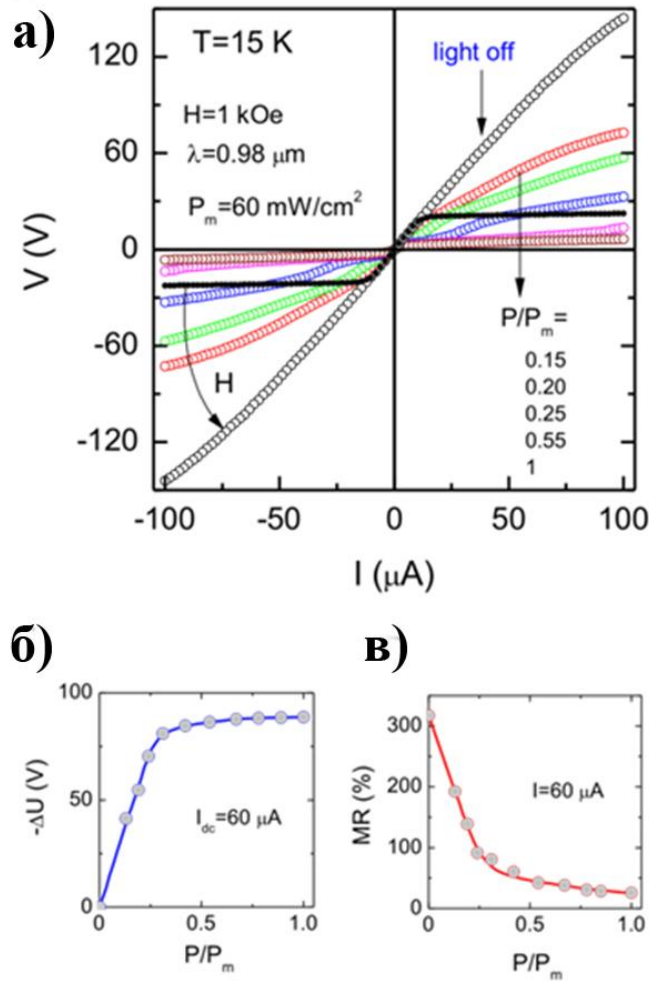
бются к разным типам: один из них MASC, другой MISC типа. Для первого типа спины носителей ориентированы вдоль суммарной намагниченности, а для второго – противоположно. Хорошо известно, что манганит LSMO – ферромагнетик MASC типа, поэтому MnSi следует, по-видимому, отнести к ферромагнетикам MISC типа. Это на самом деле подтверждается расчетами плотности электронных состояний[6]. Только в этом случае, в случае электродов, принадлежащих к разным типам, сопротивление перехода будет



**Рис. 2** - Структура LSMO/LSM<sub>1-δ</sub>O/MnSi/SiO<sub>2</sub> в ТВП геометрии: а) температурная зависимость сопротивления при двух токах смещения выше и ниже критического  $I_{th}$ ; б) ВАХ без магнитного поля и в полях 1 и 10 кЭ; в) зависимость сопротивления от магнитного поля при токе  $I = 60$  мкА при различных температурах; г) зависимость магнитосопротивления  $TMR$  от тока смещения через структуру

больше при параллельной ориентации намагниченностей электродов, чем при антипараллельной. Таким образом, в отсутствие магнитного поля, благодаря магнитостатическому взаимодействию  $\mathbf{M}_M$  и  $\mathbf{M}_S$  ориентированы анти-

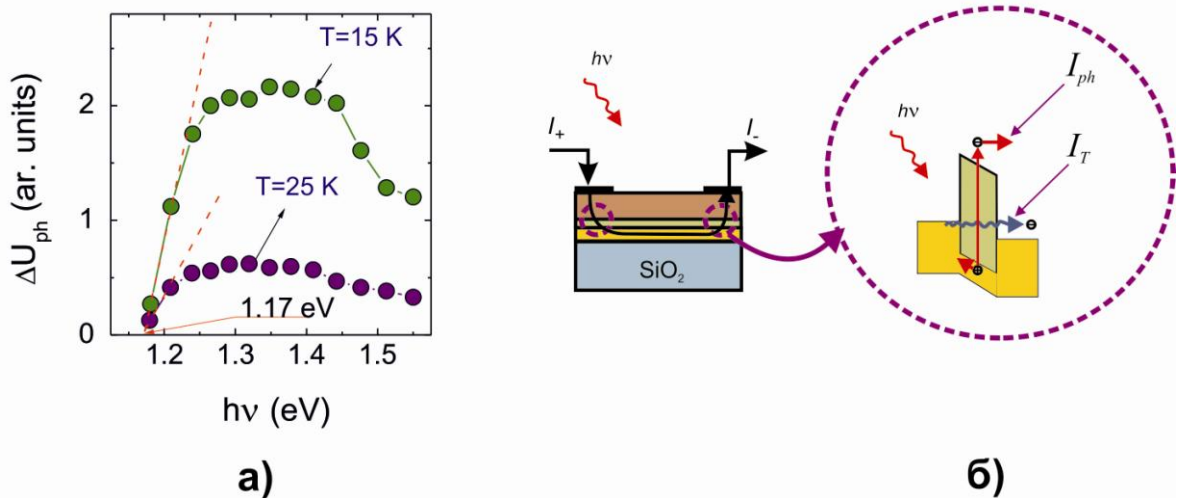
параллельно, сопротивление туннельного перехода минимально, и при  $I > I_{th}$  ток в структуре течет по нижнему слою. Магнитное поле стремится ориентировать  $\mathbf{M}_M$  и  $\mathbf{M}_S$  параллельно, сопротивление перехода  $R_T$  увеличивается и становится больше, чем сопротивление пленки манганита  $R_{FM1}$ , ток даже при  $I > I_{th}$  начинает течь преимущественно по верхнему слою структуры, ВАХ которого линейна.



**Рис. 3** - Структура LSMO/LSM<sub>1.5</sub>O/MnSi/SiO<sub>2</sub> в геометрии ток в плоскости. а) ВАХи структуры; без облучения при  $H = 0$  и  $H = 1\text{ kOe}$  и при разных мощностях оптического воздействия в магнитном поле. б) Фотоиндуцированное изменение напряжения на структуре в зависимости от мощности оптического излучения при  $I_{dc} = 60\ \mu\text{A}$ . в) Фотоиндуцированное изменение магниторезистивного эффекта на структуре в зависимости от мощности оптического излучения при  $I_{dc} = 60\ \mu\text{A}$

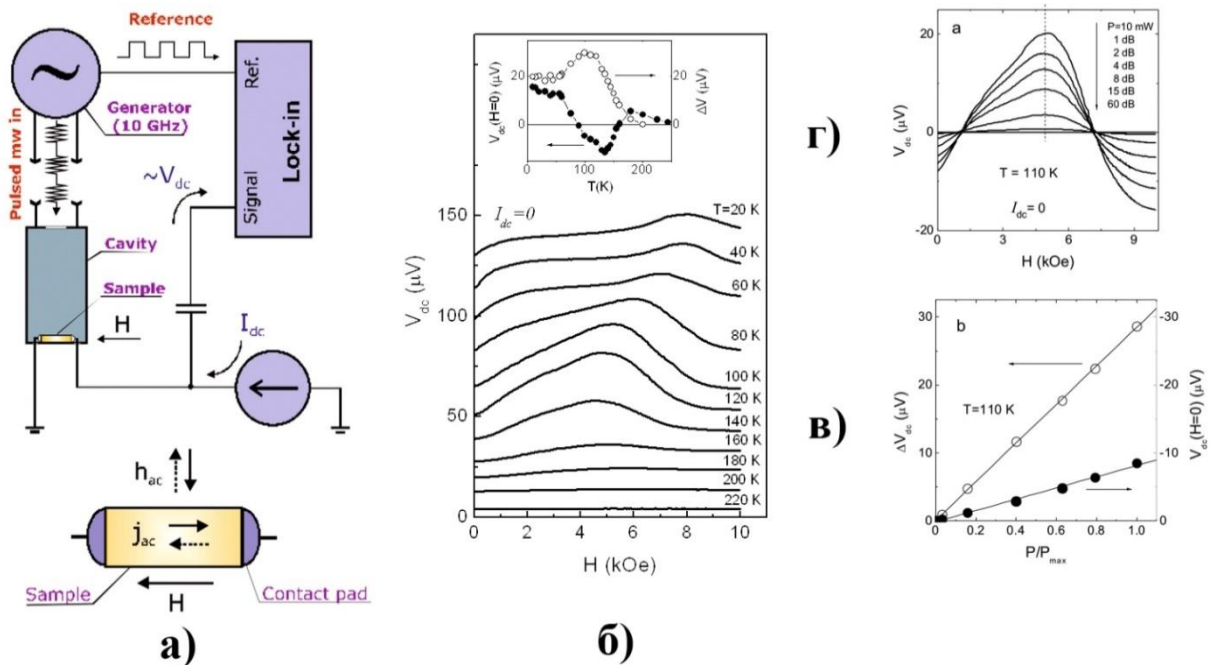
Также было исследовано влияние оптического облучения на магнитную туннельную структуру. Типичный вид изменений ВАХ при воздействии оптического излучения показан на Рис. 3а. Рис. 3б демонстрирует поведение

в зависимости от мощности оптического излучения фотоиндуцированного изменения напряжения на структуре при фиксированном токе. Зависимость магниторезистивного эффекта структуры от мощности оптического излучения показана на Рис. 3в. Хорошо видно, что фотоиндуцированные изменения быстро выходят на насыщение при относительно малых значениях оптической мощности и не меняются при дальнейшем увеличении мощности. Это позволяет говорить о том, что наблюдаемые изменения не связаны с тривиальным нагревом структуры за счет поглощения света. Об этом же свидетельствует спектральная зависимость фотоэлектрического эффекта (Рис. 4а). Зависимость имеет пороговый характер, изменения транспортных свойств наблюдаются только для оптического излучения с энергией кванта выше  $(h\nu)_{th} \approx 1.17$  эВ. Анализ спектральных зависимостей позволяет сделать заключение, что фотоэлектрический эффект связан с межзонным поглощением света в диэлектрической прослойке структуры с образованием электрон-дырочной пары (Рис. 4б), а не с фотоэмиссией электронов из металлических электродов.



**Рис. 4** - Структура LSMO/LSM<sub>1-δ</sub>O/MnSi/SiO<sub>2</sub> в геометрии ток в плоскости. а) Спектральная зависимость фотоиндуцированных изменений  $\Delta U_{ph}$  при  $T = 15$  К и  $T = 25$  К. б) Схематическая диаграмма туннельного перехода; наряду с туннельным током  $I_T$  при оптическом облучении возникает фототок  $I_{ph}$ , обусловленный генерацией электрон-дырочных пар при межзонном поглощении в диэлектрическом слое

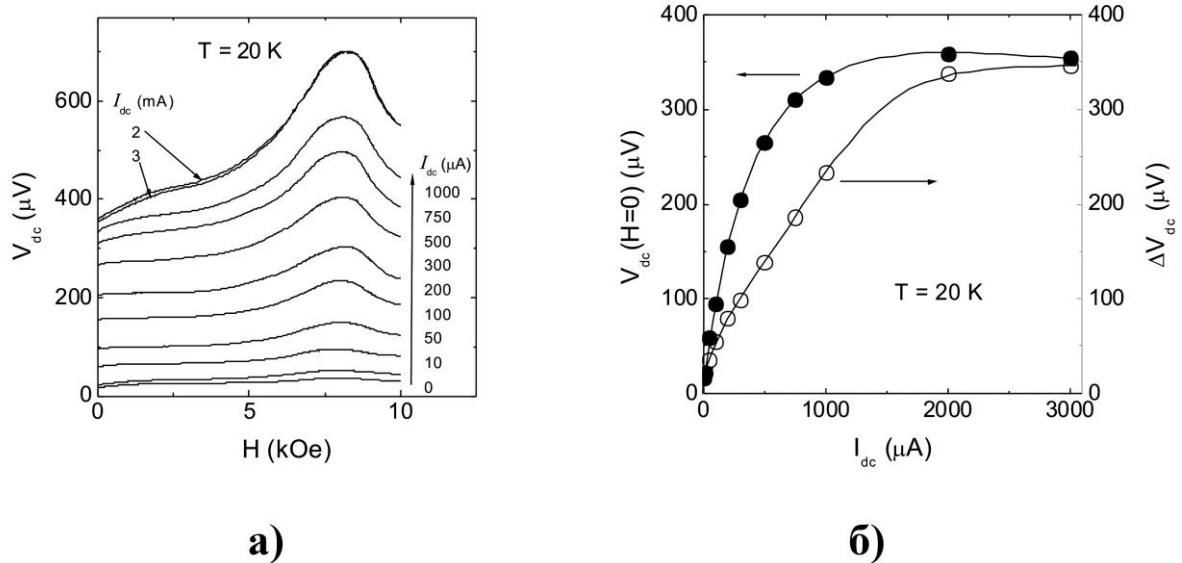
**Четвертая глава** посвящена исследованию магнитозависимого эффекта детектирования СВЧ излучения в гранулированном образце манганита  $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ , представляющем собой кооперативную систему магнитных туннельных контактов. Образец в форме пластинки был помещен в СВЧ резонатор, в пучность магнитного поля в геометрии как показано на Рис. 5а. На Рис. 5б приведено поведение постоянного напряжения  $V_{dc}$ , генерируемого образцом при воздействии СВЧ излучения, при изменении внешнего магнитного поля  $H$ . Зависимости были получены при различных температурах. Детектируемое постоянное напряжение  $V_{dc}$  появляется при температурах ниже 250 К, которая примерно совпадает с температурой ферромагнитного упорядочения в  $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ . Однако заметное влияние магнитного поля на  $V_{dc}$  обнаруживается при более низких температурах, ниже 180 К. Наиболее сильное влияние магнитного поля наблюдается вблизи температуры 100 К. При



**Рис. 5** - а) Принципиальная схема установки для исследования отклика системы на воздействие электромагнитного излучения СВЧ диапазона; б) Детектируемое постоянное напряжение на образце  $V_{dc}$  при воздействии СВЧ излучения как функция внешнего магнитного поля; ток смещения через образец  $I_{dc}=0$ ; приведены зависимости, полученные при разных температурах; кривые смещены для наглядности вдоль оси ординат на определенную величину; в) Зависимость от СВЧ мощности величин  $V_{dc}$  при  $H=0$  и  $\Delta V_{dc}=V_{dc}(H_m)-V_{dc}(0)$ ;  $H_m$  - магнитное поле, соответствующее максимуму на кривой  $V_{dc}(H)$ ; г) Зависимости детектируемого напряжения  $V_{dc}$  от магнитного поля при разных уровнях СВЧ мощности; максимальная СВЧ мощность  $P_{mw}^{\max} = 10$  мВт; ток смещения  $I_{dc}=0$ ; температура  $T = 110$  К

дальнейшем понижении температуры пик расплывается и становится менее выраженным: как следствие,  $\Delta V_{dc}$  уменьшается. Исследования показали, что полный сигнал  $V_{dc}$  представляет собой сумму двух вкладов. Один из них не зависит от магнитного поля, другой вклад является магнитозависимым. Именно магнитозависимый отклик образца на воздействие СВЧ излучения является наиболее интересным эффектом.

Было обнаружено, что магнитозависимый и магнитонезависимый вклады в эффект детектирования СВЧ излучения в поликристаллическом  $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ , в зависимости от мощности СВЧ излучения, ведут себя линейно, что говорит о том, что образец ведет себя как квадратичный СВЧ детектор (Рис. 5в, 5г).

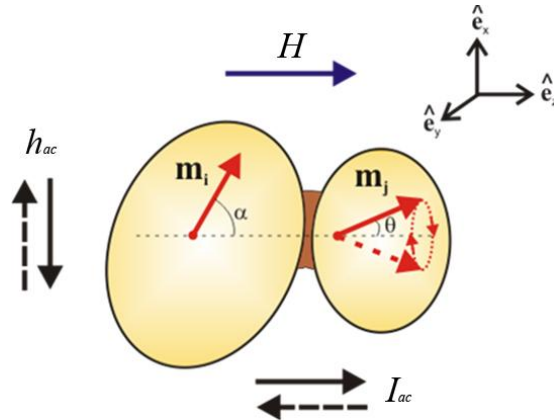


**Рис. 6** - а) Детектируемое напряжение  $V_{dc}$  как функция магнитного поля различных величинах тока смещения; температура  $T = 20$  К. б) Зависимости величин  $V_{dc}$  при  $H = 0$  и  $\Delta V_{dc} = V_{dc}(H_m) - V_{dc}(0)$  от тока смещения  $I_{dc}$  через образец;  $H_m$  - магнитное поле, соответствующее максимуму на кривой  $V_{dc}(H)$

Исследования влияния тока смещения  $I_{dc}$  через образец на детектируемое напряжение  $V_{dc}$ , показали, что форма зависимости  $V_{dc}(H)$  не претерпевает существенного изменения при изменении тока смещения, но величина детектируемого напряжения сильно растет при увеличении тока смещения вплоть до величины  $I_{dc} \sim 2$  mA (Рис. 6).

Была предложена модель, описывающая для магнитозависимого вклада в эффект детектирования СВЧ излучения. Принципиальные детали механизма детектирования в кооперативной сети туннельных контактов удобно рассмотреть на примере одиночного туннельного контакта, сформированного

соседними ферромагнитными гранулами, разделенными тонкой изолирующей границей (Рис. 7).



**Рис. 7** - Схематический рисунок контакта двух ферромагнитных гранул, поясняющий магнитоиндуцированный механизм детектирования СВЧ излучения

Каждое из зерен характеризуется своей коэрцитивной силой и, следовательно, различными магниторезонансными условиями. Предположим, что при определенной величине магнитного поля, направленного вдоль траектории тока, магнитный момент  $i$ -ой гранулы фиксирован под углом  $\alpha$  к направлению поля, а  $j$ -я гранула находится в резонансных условиях, и ее момент прецессирует с частотой  $f$ . Эта прецессия приводит к временной зависимости сопротивления  $R_T = R(t)$ . Учитывая, что высокочастотное магнитное поле  $h_{ac}$  индуцирует также высокочастотный ток через туннельный контакт  $I(t) = I_{ac} \sin(2\pi ft - \delta)$ , на образце появится выпрямленное напряжение  $V_{dc}$ :

$$V_{dc} = \langle I(t)R(t) \rangle_T = \frac{I_{ac}(R_{\downarrow\downarrow} - R_{\uparrow\uparrow})}{4} \sin \theta \sin \alpha \cos(\phi - \delta) \quad (1)$$

Для качественной интерпретации механизма детектирования удобно воспользоваться Рис. 7. При  $\phi - \delta = 0$  сопротивление для спинового тока, текущего из  $i$ -ой гранулы в  $j$ -ю гранулу меньше благодаря меньшему углу между  $\mathbf{m}_i$  и  $\mathbf{m}_j$ , в то же время для противоположного направления тока сопротивление больше благодаря большему углу. Именно этот результат количественно отражает уравнение (1), давая функциональную зависимость от  $\theta$  и  $\alpha$ .

**В заключении** диссертации кратко сформулированы основные результаты работы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Впервые проведено исследование транспортных свойств магнитной туннельной структуры LSMO/LSM<sub>1-δ</sub>O/MnSi/SiO<sub>2</sub> в геометрии «ток в плоскости». Показано, что особенности транспортных свойств туннельной структуры LSMO/LSM<sub>1-δ</sub>O/MnSi/SiO<sub>2</sub> в планарной геометрии определяются эффектом переключения токовых каналов между слоями структуры.
2. Обнаружено, что эффект переключения управляется током смещения через структуру и магнитным полем. Установлено, что основными элементами, отвечающими за процесс перемагничивания, являются туннельные переходы под токовыми контактами, сопротивление которых зависит от смещения и взаимной ориентации намагниченностей ферромагнитных электродов. Последнее обуславливает магнитоуправляемый эффект, управляемый током смещения.
3. Обнаружен фотоэлектрический эффект. Установлено, что эффект определяется генерацией электрон-дырочных пар при межзонном поглощении света в диэлектрическом слое туннельной структуры.
4. Впервые обнаружен эффект СВЧ детектирования, управляемый магнитным полем в поликристаллическом образце, представляющим собой кооперативную систему магнитных туннельных контактов. Проведено исследование эффекта в зависимости от температуры, тока смещения, мощности СВЧ излучения.
5. Предложена модель, объясняющая магнитозависимый вклад в детектируемое напряжение и поведение этого вклада в зависимости от температуры, тока смещения и мощности СВЧ излучения. В основе модели - взаимосвязь спин-поляризованного тока через магнитные туннельные контакты и спиновой динамики, индуцированной в ферромагнитных гранулах, формирующих магнитные туннельные контакты в образце.

## ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Volkov N.V., Eremin E.V., Shaykhutdinov K.A., Tsikalov V.S., Petrov M.I., Balaev D.A., Semenov S.V. The magnetic-field-driven effect of microwave detection in a manganite granular system // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2008. – V.41, issue 1. – P. 5004-5012.
2. Volkov N.V., Eremin E.V., Tsikalov V.S., Patrin G.S., Kim P.D., Yu Seong-Cho, Dong-Hyun Kim, and Nguyen Chau. Current-driven channel switching and colossal positive magnetoresistance in the manganite-based structure // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2009. – V. 42, issue 6. – P. 5005-5011.
3. Волков Н.В., Еремин Е.В., Цикалов В.С., Патрин Г.С., Ким П.Д., Seong-Cho Yu, Dong-Hyun Kim, Nguyen Chau. Эффекты переключения токовых каналов и новый механизм магнитосопротивления в туннельной структуре // ПЖТФ. – 2009. Т.35, вып. 21. – С.33-41.
4. Волков Н.В., Еремин Е.В., Цикалов В.С., Шайхутдинов К.А. Магнитоуправляемый детектор СВЧ излучения. Патент РФ № 2347296, от 16.07.2007 г., Бюл. №05, 20.02.2009.
5. Volkov N.V., Eremin E.V., Shaykhudinov K.A., Tsikalov V.S., Petrov M.I., Martyanov O.N. Microwave detection in manganite granular system // International Conference Functional Materials (ICFM – 2007), Abstracts, Ukraine, Crimea. – 2009. – P.121.
6. Volkov N.V., Eremin E.V., Shaykhudinov K.A., Tsikalov V.S., Petrov M.I., Balaev D.A., and Semenov S.V.. The magneto-depended effect of microwave detection in a manganite granular system // Euro-Asian Symposium Magnetism on a Nanoscale (EASTMAG-2007), Abstract Book, Kasan, Russia, July 23-26. – 2007. – P. 40.
7. Volkov N.V., Eremin E.V., Tsikalov V.S., Kim P. D., Seong-Cho Yu, Dong-Hyun Kim, Nguyen Chau. Nonlinear charge transport in the epitaxial  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$  Film: Effect of magnetic field and optical radiation // Moscow International Symposium on Magnetism (MISM 2008), Book of Abstracts, Moscow, Russia, June 20-25. — 2008. – P. 626.
8. Волков Н.В., Патрин К.Г., Еремин Е.В., Цикалов В.С. Влияние транспортного тока на неоднородное магнитное состояние кристалла  $(\text{La}_{0.4}\text{Eu}_{0.6})_{0.7}\text{Pb}_{0.3}\text{MnO}_3$  // Школа-семинар Новые магнитные материалы микроэлектроники (НМММ XX), Сборник трудов, Россия, Москва, 12-16 июня. – 2006. – С. БП-11.
9. Volkov N.V., Eremin E.V., Tsikalov V.S., Kim P.D., Seong-Cho Yu, Dong-Hyun Kim, Chau N. Nonlinear Charge in the Magnetite/Semiconductor Structure: Effect of Magnetic Field and Optical Radiation // The Eighth International Ural Seminar Radiation damage physics of metals and alloys, Abstracts, Russia, Snezhinsk, Feb 23 – Mar 1, –2009 –С. 63.



## СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fert A.. The origin, development and future of spintronic // UFN. – 2008. –
2. Грюнберг П.А. От спиновых волн к гигантскому магнетосопротивлению и далее // УФН. – 2008. – Т. 178. Вып.12. С. 1349-1358.
3. Ralph D.C., Stiles M.D. Spin transfer torques // J. Magn. Magn. Mater. –2008. – V.320. issue 7. – P. 1190-1216.
4. Kiselev S.I., Sankey J.C., Krivorotov I.N., Emley N.C., Schoelkopf R.J., Buhrman R.A., & Ralph D.C. Microwave oscillations of a nanomagnet driven by a spin-polarized current // Nature. – 2003. – V.425. – P. 380-383.
5. Suzuki Y, Kubota HJ. Phys. Spin-Torque Diode Effect and Its Application // Soc. Jpn. – 2008. – V.77, issue 3. – P. 1002-1009.
6. Mahbube Hortamani, Hua Wu, Peter Kratzer, and Matthias Scheffler. Epitaxy of Mn on Si(001): Adsorption, surface diffusion, and magnetic properties studied by density-functional theory // Phys. Rev. B. – 2006. –V.74, issue 20. – P. 5305-5315.