На правах рукописи

Тарасов Антон Сергеевич

МАГНИТОТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА ГИБРИДНЫХ СТРУТКУР $Fe/SiO_2/p\text{-}Si$,

Специальность 01.04.11 – физика магнитных явлений

Автореферат

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Красноярск 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук (ИФ СО РАН)

Научный руководитель:	доктор физико-математических наук, доцент Волков Никита Валентинович, директор ИФ СО РАН
Официальные оппоненты:	доктор физико-математических наук, профессор Вальков Валерий Владимирович, Лаборатория теоретической физики ИФ СО РАН, заведующий лабораторией
	доктор физико-математических наук Кусраев Юрий Георгиевич, Отделение физики твердого тела физико-технического Института имени А.Ф. Иоффе, руководитель отделения
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук

Защита состоится « »_____2013 г. в __:__ на заседании диссертационного совета Д 003.055.02 при ИФ СО РАН по адресу: 660036, г. Красноярск, Академгородок 50, стр. 38.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФ СО РАН.

Автореферат разослан « »_____2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук Втюрин А. Н.

Актуальность темы. Исследования отклика магнитных наноразмерных систем на протекание спин-поляризованного тока принесли в последние годы много интереснейших результатов, которые сделали весьма привлекательной идею использования спина электрона в качестве активного элемента для хранения, обработки и передачи информации [1,2]. Это послужило формированию нового направления в физике конденсированного состояния – спинтроники. Этот раздел охватывает и фундаментальные вопросы спиновых явлений и прикладные вопросы, связанные с созданием принципиально новых электронных устройств. Причем, как это обычно бывает, трудно провести границу, где решаются фундаментальные, а где прикладные задачи.

Одно из самых привлекательных и бурно развивающихся направлений в спинтронике в настоящее время – гибридные наноструктуры, представляющие собой различные комбинации немагнитных полупроводниковых и ферромагнитных (ФМ) элементов [3, 4].Такие структуры объединяют огромный потенциал традиционной полупроводниковой электроники с потенциалом магнитных материалов – возможностью управлять электронным транспортом, манипулируя спиновым состоянием электронов или использовать спиновый транспорт. Таким образом, функциональные возможности гибридных структур могут быть существенно расширены и даже могут приобрести принципиально новое качество за счет использования наряду с зарядом спиновых степеней свободы. На пути к практическому применению гибридных структур необходимо решить целый ряд вопросов фундаментального характера, включая такие вопросы, как спиновая инжекция в полупроводник, детектирование спиновой поляризации, спиновая аккумуляция, эффективное управление спиновым транспортом в полупроводнике, спиновая диффузия, спиновая релаксация и др.

Немаловажный вопрос – динамические свойства гибридных структур, в частности, электрические свойства на переменном токе. Необходимость исследования импеданса и магнитоимпеданса в магнитных гибридных наноструктурах диктуется, в первую очередь, возможностью их применения в устройствах,

работающих на высоких частотах [5]. Но, с другой стороны, использование импедансной спектроскопии открывает путь для более пристального взгляда на природу явлений имеющих место в гибридных структурах. Например, исследования импеданса и магнитоимпеданса позволяют разделить динамические вклады, определяемые процессами переноса заряда и спина, зарядовой и спиновой релаксации в различных участках неоднородных материалов и наноструктур [6].

Кроме того, огромный интерес представляют исследования спин-зависимого транспорта в структурах ферромагнетик/полупроводник в случае внешних комбинированных воздействий. С одной стороны, исследуя характер отклика можно получать дополнительную информацию фундаментального характера о спин-зависимых процессах, имеющих место в гибридных структурах. С другой стороны, подобные исследования позволят обнаружить новые возможности контроля спинового состояния носителей заряда и активного управления им в полупроводниках. Одним из каналов управления свойствами полупроводников является оптическое облучение. При этом, как оказалось, можно управлять не только концентрацией неравновесных носителей, но и их спиновым состоянием [7], то есть в целом, спин-зависимым электронным транспортом.

Цель работы. Целью настоящей работы является изучение явлений магнитозависимого электронного транспорта в гибридных структурах Fe/SiO_2/p-Si и простейших устройствах на их основе.

В связи с этим, в работе были поставлены следующие **задачи**:

1. Провести исследования транспортных и магнитотранспортных свойств структуры Fe/SiO_2/p-Si и планарного устройства Fe/SiO_2/p-Si на постоянном токе в широком температурном диапазоне.
2. Исследовать поведение импеданса планарного устройства Fe/SiO_2/p-Si в зависимости от температуры, магнитного поля и частоты прикладываемого переменного напряжения.

3. Провести исследование влияния комбинированного воздействия оптического облучения и магнитного поля на транспортные свойства структуры $Fe/SiO_2/p\text{-}Si$ и планарного устройства $Fe/SiO_2/p\text{-}Si$.

Научная новизна.

1. Обнаружен эффект переключения токовых каналов между слоями структуры $Fe/SiO_2/p\text{-}Si$. Установлено, что особенности транспортных свойств определяются переходом метал/диэлектрик/полупроводник с барьером Шоттки, который формируется на границе раздела $SiO_2/p\text{-}Si$.
2. Обнаружен эффект положительного магнитосопротивления в исследуемых структурах при температурах выше 250 K , который обусловлен механизмом слабой локализации, имеющим место при протекании тока в объеме полупроводника.
3. Впервые для планарного устройства, представляющего собой два диода Шоттки, включенных навстречу друг другу, обнаружен магниторезистивный эффект, управляемый током смещения. Установлено, что эффект отрицательного магнитосопротивления наблюдается при переходе диода в режим инверсии. Поэтому отрицательное магнитосопротивление необходимо связывать с инверсионным слоем, который формируется в узком слое вблизи границы $SiO_2/p\text{-}Si$.
4. Впервые обнаружен гигантский частотно-зависимый магниторезистивный эффект на переменном токе для гибридных структур. Установлено, что особенности транспортных свойств на переменном токе обусловлены процессами перезарядки поверхностных центров на границе раздела $SiO_2/p\text{-}Si$. Основной механизм магнитосопротивления – изменение энергетической структуры уровней поверхностных состояний в магнитном поле.
5. Впервые обнаружен оптически индуцированный гигантский магниторезистивный эффект достигающий величин 10^4 % в магнитных полях не более 2 кЭ и температуре T = 15 K. Выявлена сильная зависимость величина и знака оптически индуцированного гигантского магниторезистивного эф-

фекта от смещения на устройстве и направления приложенного магнитного поля. Установлено, что, как и в случае магнитоимпедансом, за данный эффект ответственны поверхностные центры.

Практическая значимость. Результаты проведенных исследований позволяют получить дополнительную информацию о процессах, имеющих место в гибридных структурах при протекании транспортного тока, открыть новые возможности контроля спинового состояния носителей заряда и активного управления ими. Полученные результаты открывают новое направление в кремниевой спинтронике – использование явлений спин-зависимого туннелирования и спинового транспорта в целом в гибридных структурах с участием «магнитных» поверхностных центров. Принимая во внимание, высокий уровень развития полупроводниковой технологии, можно задуматься о целенаправленном создании «магнитных» поверхностных центров с заданными свойствами в гибридных структурах с барьером Шоттки. Это позволит реализовать магнитозависимые эффекты перспективные для применения в устройствах спинтроники при комнатных температурах и в заданных частотных диапазонах.

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

Защищаемые положения.

1. Результаты исследования транспортных и магнитотранспортных свойств гибридных структур $Fe/SiO_2/p\text{-}Si$ на постоянном и переменном токе, а также в условиях внешнего оптического облучения с использованием планарной геометрии.
2. Установление механизмов магнитосопротивления на постоянном и переменном токе, а также возникновение эффекта магнитосопротивления при воздействии оптического облучения.

Апробация работы. Основные результаты диссертационой работы докладывались на: 4-ом Евразийском симпозиуме по магнетизму «Trends in MAG-

netism» (EASTMAG), 2010, Екатеринбург; на 5-ом Московском международном симпозиуме по магнетизму «MISM», 2011, Москва; на совместном Европейском магнитном симпозиуме «JEMS2012», 2012, Парма, Италия; на 16-ом международном симпозиуме «Нанофизика и наноэлектроника», Нижний Новгород, 2012; на 17-ом международном симпозиуме «Нанофизика и наноэлектроника», Нижний Новгород, 2013.

Структура диссертации. Работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Диссертация изложена на 124 страницах машинописного текста, включая 55 рисунков. Библиографический список содержит 80 наименований.

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. Вначале рассмотрена проблема рассогласования проводимостей, которая заключается в невозможности прямой инжекции спин-поляризованных носителей из высокопроводящих ферромагнитных металлов в полупроводники. Показано, что введение тонкого диэлектрического слоя или барьера Шоттки в интерфейс металл/полупроводник позволяет разрешить вышеуказанную проблему. На основе этого заключения ведется рассуждение о выборе материалов для гибридных структур и будущих устройств спинтроники.

Затем приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований спин-поляризованного электронного транспорта в гибридных структурах. Рассматриваются особенности и преимущества планарной геометрии, а также многотерминальные схемы измерений для инжекции и детектирования спин-поляризованных носителей заряда посредством эффектов Ханле и анизотропного магнитосопротивления. Кроме того, рассматриваются результаты ис-

следований гибридных структур на переменном токе и в условиях оптического облучения.

Во второй главе приведены экспериментальные методы исследования и описан способ получения структур $Fe/SiO_2/p\text{-}Si$.

Большая часть измерений по исследованию магнитных и транспортных свойств образцов проводилась на широкофункциональной серийной установке, предназначенной для исследования физических свойств твердых тел PPMS-9, Quantum Design. Для исследования магнитотранспортных свойств структур на постоянном токе в условиях оптического облучения была создана специальная установка. Она укомплектована двумя полупроводниковыми лазерами с длинами волн 980 и 675 нм мощностью 500 и 1000 мВт соответственно, галогеновой лампой накаливания мощностью 100 Вт в комплексе с призменным монохроматором. Для исследования импеданса и магнитоимпеданса нами была подготовлена еще одна установка. Она базируется на двух анализаторах импеданса (LCR – метрах), что позволяет проводить измерения в диапазоне частот от 20Гц до 3ГГц.

Гибридные структуры $Fe/SiO_2/p\text{-}Si$ были получены в лаборатории Физики магнитных явлений ИФ СО РАН Варнаковым С.Н. В качестве полупроводника выступала пластина кремния, легированная бором и, следовательно, обладающая проводимостью р-типа. Для синтеза структуры использовалась полированная грань (100). На поверхности пластины был получен диэлектрический слой SiO_2 толщиной 2 нм. Сверху было нанесено железа методом термического испарения в сверхвысоком вакууме ($6{,}5*10^{-8}$ Па) при комнатной температуре. Нами были получены структуры с толщинами пленки Fe 5, 8 и 12 нм. Образцы для исследований были разрезаны на прямоугольники 3×8 мм^2. Также нами было подготовлено простейшее планарное устройство, представляющее собой два диода металл/ диэлектрик/полупроводник (МДП) включенных навстречу друг другу.

В третьей главе представлены результаты исследований транспортных и магнитотранспортных свойств структуры Fe/SiO_2/p-Si на постоянном токе, в геометрии «ток в плоскости» (ТВП) (рисунок 1а). На рисунке 1б приведены температурные зависимости сопротивления R структуры. Основная особенность в поведении R – резкий, явно выраженный скачок сопротивления образца в температурном диапазоне 250-200 К, который объясняется переключением токового канала между полупроводниковой подложкой и пленкой железа. При высоких температурах, $T > 250$ К, ток течет преимущественно по полупроводниковой подложке. Ниже 250 К сопротивление туннельного перехода начинает быстро расти и при 200 К более выгодным становиться токовый путь по верхней пленке железа. Как видно, эффектом переключения токовых каналов можно управлять током смещения.

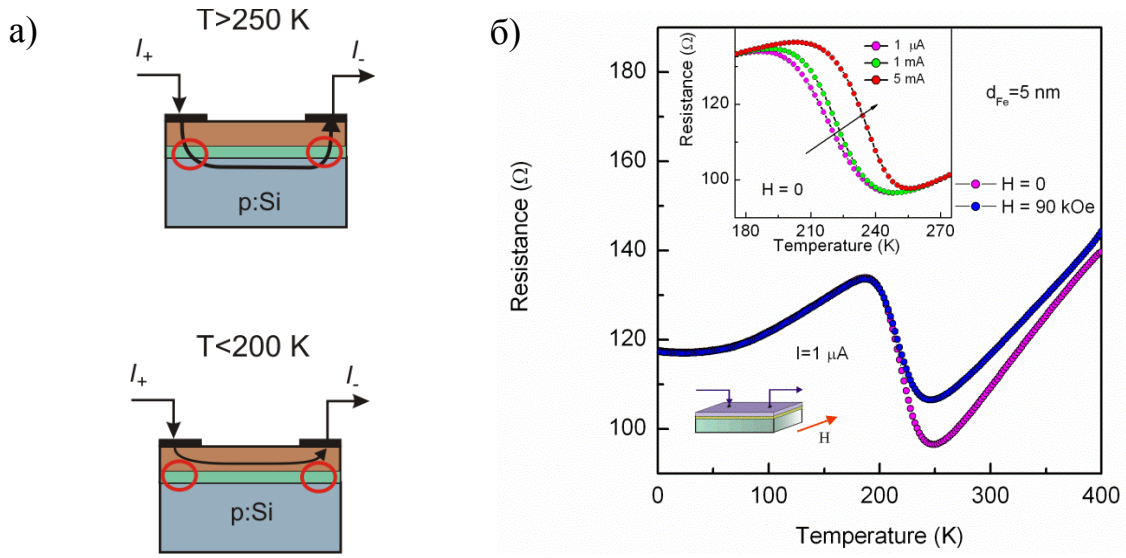

Рисунок 1 - а) геометрия эксперимента и пути протекания тока в структуре Fe/SiO_2/p-Si выше и ниже температуры переключения; б) температурные зависимости сопротивления R структуры «со сплошной пленкой» в магнитном поле 90кЭ и без магнитного поля

Чтобы подтвердить предположение о переключении токовых каналов, было исследовано планарное устройство (нижняя вставка на рисунке 2а). На рисунке 2 представлены температурные зависимости сопротивления и вольт-амперные характеристики (ВАХ) для планарного устройства. Как можно было

бы предполагать, поведение сопротивления устройства при $T > 250$ К, качественно повторяет поведение для структуры, рисунок 2а. Но ниже 250 К R начинает экспоненциально быстро расти, достигая величины ~ 10^5 Ом уже при $T = 100$ К, свидетельствуя о быстром росте сопротивления туннельного перехода Fe/SiO_2/p-Si.

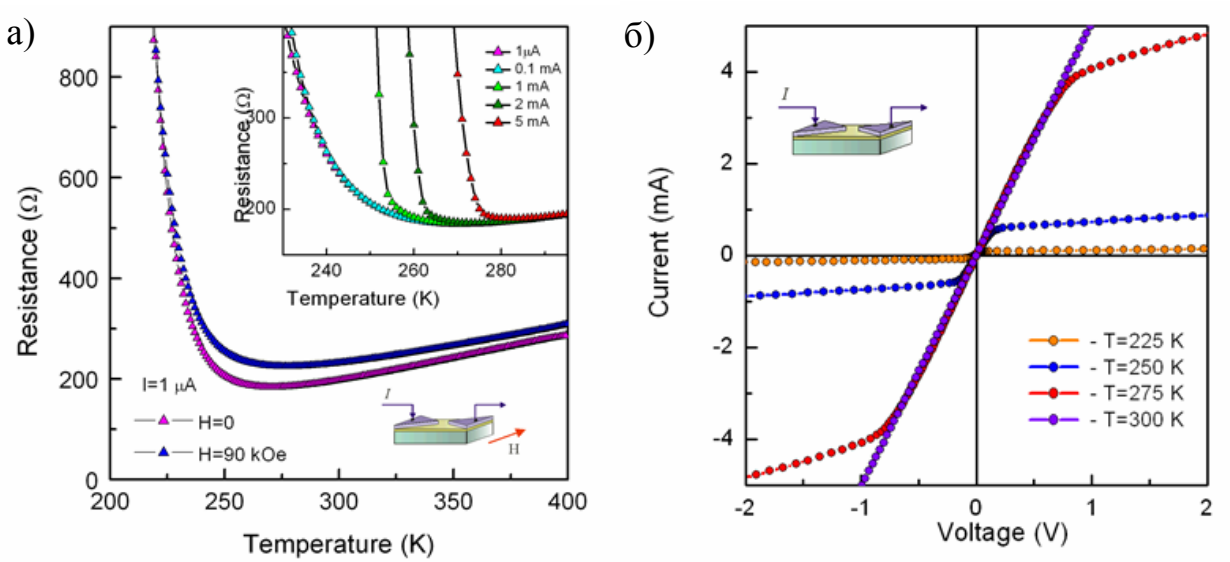

Рисунок 2 - а) температурные зависимости сопротивления R для структуры в поле $H = 0$ и $H = 90$ кЭ; ток смещения $I = 1$ μA; б) $I - V$ характеристики для устройства при различной температуре

Исследование $I - V$ характеристик образцов показало, что в случае структуры характеристики оказываются линейными практически во всем температурном диапазоне. А для планарного устройства при температурах ниже 300 К на зависимостях наблюдается резкий излом, рисунок 2б, весьма характерный для систем, где наблюдается насыщение по току.

Сравнительное исследование $I - V$ характеристик без магнитного поля и в магнитном поле показало, что выбором величины I можно менять знак и величину магнитосопротивления (МС), а переход планарного устройства в режим стабилизации по току приводит к подавлению магниторезистивного эффекта (рисунок 3а). Характерный вид полевых зависимостей R при разных величинах I показан на рисунке 3б. Как видно, при различном токе смещения реализуется, как положительное, так и отрицательное МС.

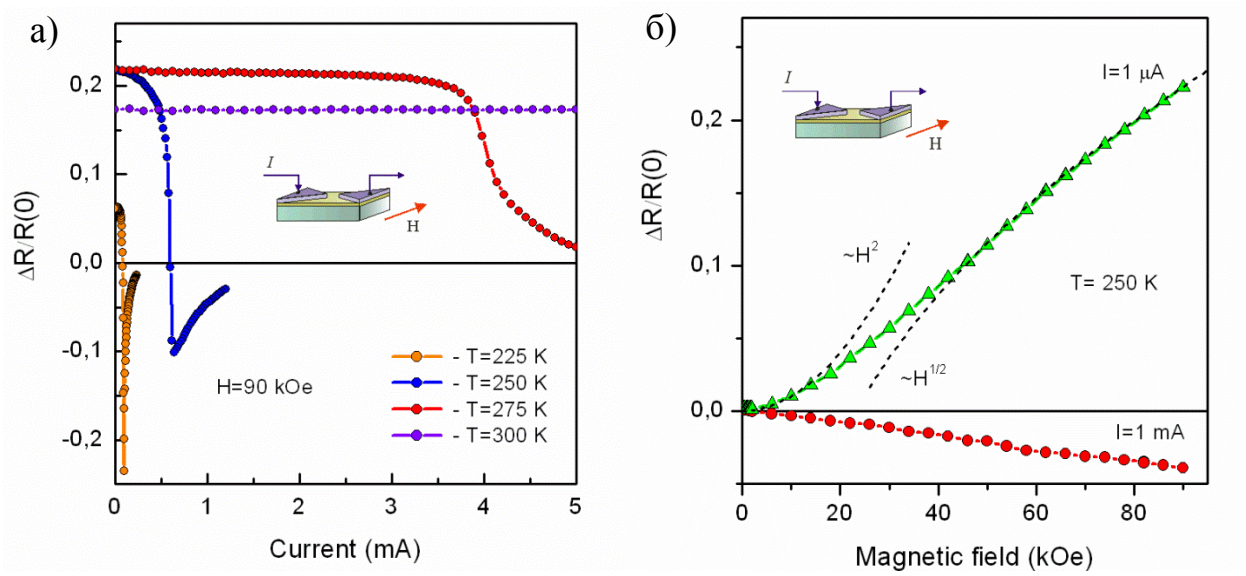

Рисунок 3 – Магнитосопротивление планарного устройства: а) зависимости МС от тока смещения при различных температурах в магнитном поле $H = 90$ kOe ; б) полевые зависимости R при $T = 250$ K измеренные на токах смещения $I = 1$ μA и $I = 1$ mA; пунктирные кривые – аппроксимация для H^2 и $\sqrt{H}$

Приведенные экспериментальные результаты позволили заключить, что наблюдаемые особенности транспортных и магнитотранспортных свойств, как структуры, так и планарного устройства определяются процессами, имеющими место при протекании тока через МДП диод с барьером Шоттки., свойства которого кардинально изменяются при изменении напряжения смещения. При малых смещениях главным является ток основных носителей (дырок), с увеличением обратного смещения приповерхностная область полупроводника обедняется основными носителями. При определенной величине смещения реализуется режим инверсии, при котором ток через переход выходит на плато и не меняется при дальнейшем увеличении смещения.. Ток через переход металл/диэлектрик/ полупроводник описывается известным выражением для термоэлектронной эмиссии с барьером Шоттки [8]. Были получены расчетные зависимости и показано, что они повторяют все основные особенности, которые обнаруживаются для экспериментальных кривых.

Относительно полевых зависимостей магнитосопротивления и МР эффекта в целом были сделаны следующие выводы. Для высоких температур эф-

фект объясняются теорией слабой локализации, согласно которой в слаборазориентированной среде при учете электронного взаимодействия реализуется положительное магнитосопротивление. Допированный бором кристалл кремния действительно можно рассматривать как среду, в которой носители заряда находятся в случайном потенциале, формируемом за счет случайного распределения примесей в объеме. Отрицательное магнитосопротивление наблюдается в режиме инверсии МДП диода. Отсюда можно заключить, что, по-видимому, отрицательное магнитосопротивление связано с тонким инверсионным слоем на границе SiO_2/p-Si, а не с объемом полупроводника. Не исключено, поэтому, что ферромагнитное состояние верхнего слоя структуры также может играть определенную роль в механизме магнитосопротивления в режиме инверсии.

В четвертой главе представлены результаты исследований частотно-зависимых магнитотранспортных свойств планарного устройства изготовленного из гибридной структуры Fe/SiO_2/p-Si. В работе использовалась экспериментальная методика измерения действительной (R) и мнимой (X) части импеданса ($Z = R + iX$).Температурные зависимости R и X для различных частот в нулевом магнитном поле показаны на рисунке 4а. На температурных зависимостях наблюдается резкий узкий пик в районе 30 К и на его правом склоне еще один небольшой пик. Именно этот пик является магнитозависимым (его величина и положение зависит от магнитного поля). На зависимостях реактивного сопротивления пики сопротивления выглядят как ступеньки.

В магнитном поле интенсивность пика P_m увеличивается, и он сдвигается в сторону высоких температур (рисунок 4б). На зависимости $X(T)$ ступеньки в магнитном поле сдвигается в сторону высоких температур (вставка на рисунке 4б). С увеличением частоты P_m на зависимости $R(T)$ сдвигается в высокие температуры, его интенсивность быстро спадает, но относительные изменения R в магнитном поле остаются большими. Тот же сценарий имеет место и для мнимой части импеданса – при увеличении частоты абсолютная величина X

уменьшается, но относительные изменения реактивного сопротивления MX в магнитном поле в области ступенек остаются большими.

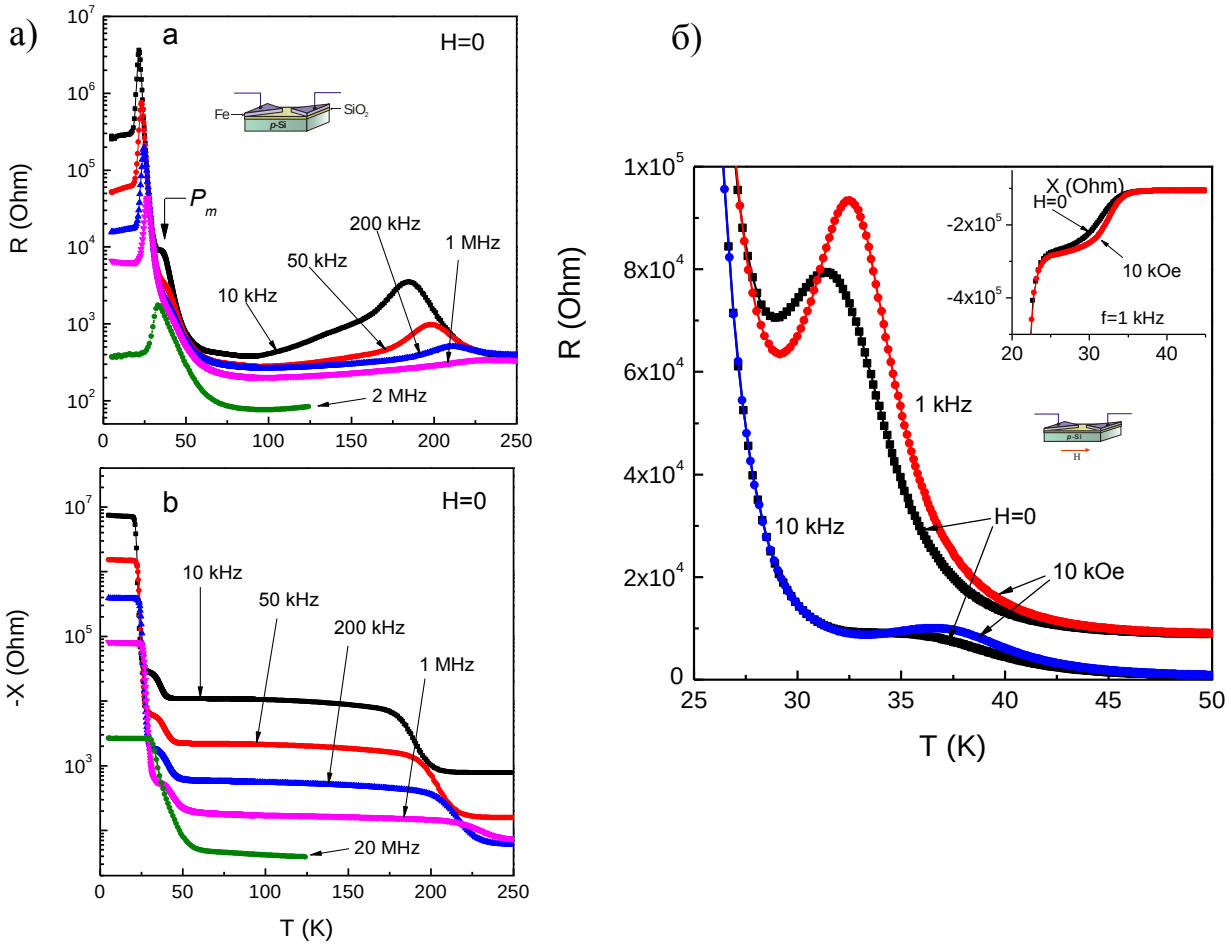

Рисунок 4 –а) Температурные зависимости действительной и мнимой частей импеданса при различных частотах для двустороннего диода Шоттки Fe/SiO_2/p-Si в нулевом магнитном поле; б) Поведение “магнитозависимого пика” P_m на зависимости $R(T)$ и $X(T)$.

Анализ литературы показал, что пики и ступи на температурных зависимостях действительной и мнимой частях импеданса действительно наблюдаются для реальных МДП-структур и обусловлены они процессами перезарядки поверхностных состояний и примесных центров, локализованных вблизи границы оксид/полупроводник (рисунок 5).

При рассмотрении температурных зависимостей можно предположить следующий сценарий. При понижении температуры уровень Ферми в p-полупроводнике понижается, приближаясь границе валентной зоны, и при оп-

ределенных температурах происходит пересечение уровня Ферми и уровня поверхностного центра. В этот момент имеет место максимальное изменение заряда центров, тогда на температурной зависимости реальной части импеданса будет наблюдаться пик и соответствующая ему ступень на мнимой части импеданса.

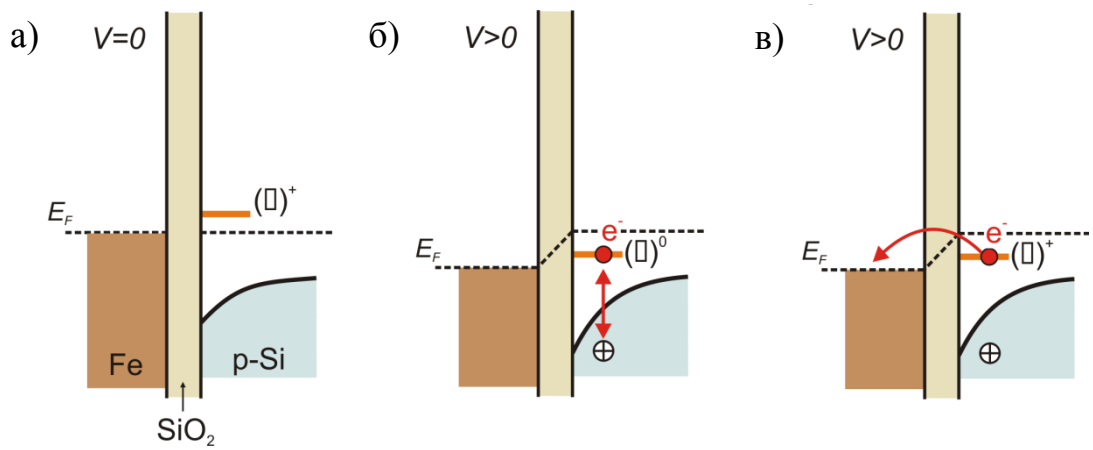

Рисунок 5 – а) Схематическая зонная диаграмма структуры Fe/SiO_2/p-Si содержащая донорные поверхностные центры $(FeB)^{0/+}$); б) Перезарядка центров при изменении напряжения в связи с термической генерацией дырок в валентной зоне; в) Перезарядка посредством туннелирования электронов с поверхностных центров в верхний электрод Fe

Затем, основываясь на анализе температурных и частотных зависимостей мнимой и действительной частей импеданса, была вычислена энергия уровня поверхностного центра чувствительного к магнитному полю. Полученное значение $E_D^0 = 0.124$ эВ весьма близко к энергии донорного центра $(FeB)^{0/+}$. Кроме того, было выяснено, что возможно два механизма перезарядки интерфейсных центров – перезарядка центров с участием валентной зоны, перезарядка посредством туннелирования электронов с поверхностных центров в верхний электрод Fe через диэлектрический слой SiO_2 (рисунок 5б и 5в).

Поскольку особенности транспортных свойств на переменном токе определяются процессами перезарядки поверхностных центров на границе SiO_2/p-Si, то причиной магнитотранспортных эффектов является индуцированная магнитным полем перестройка энергетической структуры интерфейсных центров.

Кроме того, показано, что магнитное поле величиной 10 кЭ сдвигает энергетический уровень, по крайней мере, на 20 мэВ. В качестве возможных причин такого поведения обсуждались, соответственно, следующие модели: 1) сжатие волновых функций примесных центров магнитным полем; 2) расщепление примесных зон на верхнюю и нижнюю подзоны. Однако ни в том, ни в другом случае конкретные микроскопические механизмы изменений электронной структуры примесных центров в магнитном поле остались неясными.

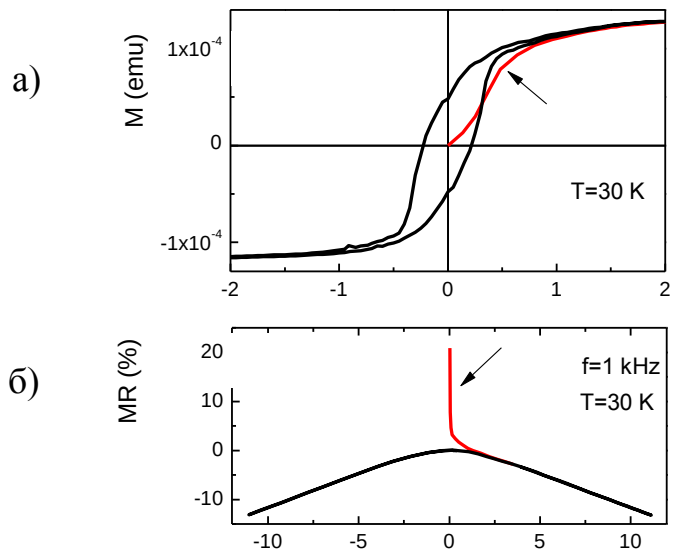

Рисунок 6 – а) Намагниченность планарного устройства Fe/SiO_2/p-Si, *M*, как функция магнитного поля при 30 K; б)Активное магнитосопротивление как функции магнитного поля при 30 K для частоты 1 kHz. Стрелками показаны части зависимостей, выполненные после охлаждения в нулевом магнитном поле.

Также был получен отрицательный магниторезистивный эффект при выполнении определенных условий. Оказалось, что если ферромагнитный электрод (Fe) полностью размагничен, и охлаждение устройства для измерений при низких температурах проводить в нулевом магнитном поле, то на зависимостях $MR(H)$ обнаруживается участок низкополевого отрицательного МС в магнитных полях от 0 до 2 кЭ, рисунок 6б, по поведению совпадающий с первоначальной кривой намагничивания слоя Fe (рисунок 6а). Такая корреляция в поведении $MR(H)$ и $M(H)$ позволяет предполагать влияние магнитного состояния ферромагнитного слоя на магнитотранспортные свойства планарного уст-

ройства на переменном токе. Это в свою очередь подразумевает наличие спин-зависимого туннелирования носителей заряда через потенциальный барьер между Fe электродом и магнитными интерфейсными центрами расположенными вблизи границы SiO_2/p-Si.

В пятой главе представлены результаты исследований транспортных и магнитотранспортных свойств гибридных структур Fe/SiO_2/p-Si с барьером Шоттки в неравновесных условиях, созданных оптическим излучением. Из общего числа выделяются два принципиальных результата: 1) гигантский магниторезистивный эффект, индуцированный оптическим излучением; 2) сильная зависимость сопротивления от величины и знака прикладываемого магнитного поля.

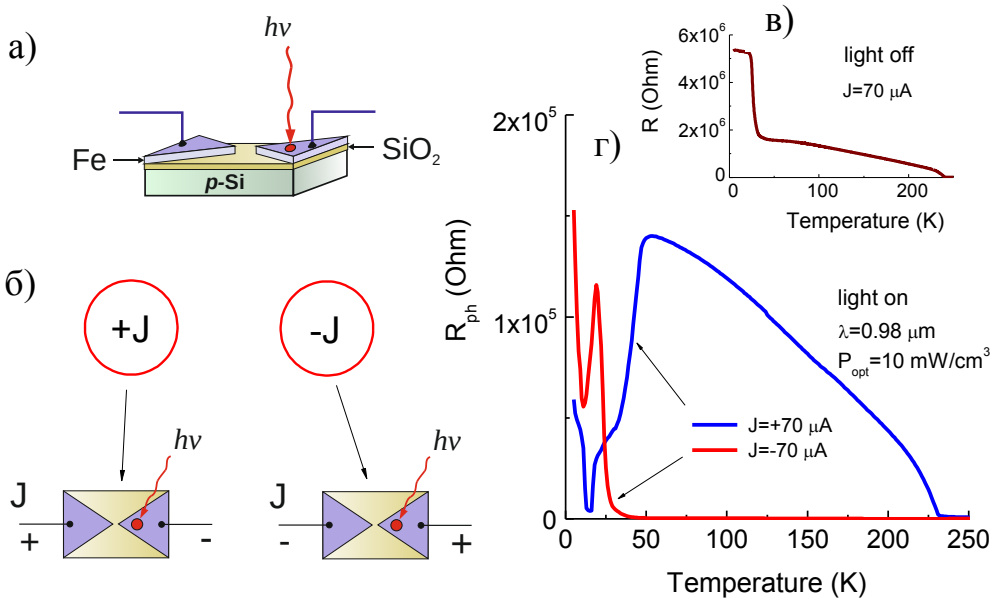

Рисунок 7 – а) Геометрия эксперимента; б) Обозначение полярности тока; в) Температурная зависимость сопротивления образца на постоянном токе; г) Зависимость R_{ph} от температуры при облучении одного из МДП диодов

Схематично геометрия эксперимента и полярность тока смещения через образец по отношению к облучаемому электроду показана на рисунок 7а и 7б. В экспериментах облучался только один из электродов устройства, через окно в специальном экране с диаметром 1 мм^2. На рисунке 7в приведена температурная зависимость сопротивления образца на постоянном токе R , полученные без

облучения. Показано, что рост R ниже температуры $T_s \sim 50$ K связан с захватом дырок донорными поверхностными состояниями и, соответственно, с выключением их из процессов проводимости на постоянном токе в тот момент, когда они оказываются выше уровня Ферми. Зависимость R_{ph} от температуры при облучении одного из МДП диодов для одной величины тока смещения ($J = 70$ μA), но двух разных полярностей J приведены на рисунке 7г. Не вдаваясь в подробности укажем, что основной вклад в фоторезистивный эффект обусловлен оптическими переходами с участием указанных поверхностных донорных состояний.

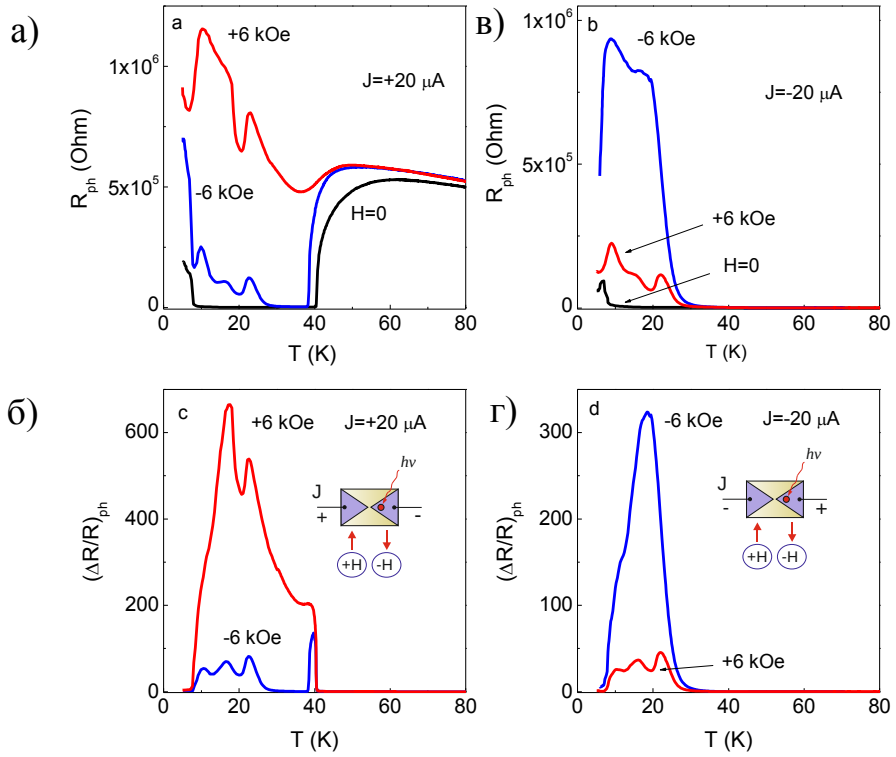

Рисунок 8 – Низкотемпературные зависимости $R_{ph}(T)$ и $\Delta R/R(T)$ полученные для $J = +20$ μA (а и б) и $J = -20$ μA (в и г)

На рисунке 8 показаны низкотемпературные зависимости $R_{ph}(T)$, полученные в условиях воздействия оптического излучения, как без магнитного по-

ля, так и в поле $H = 6$ кЭ, а также соответствующие зависимости фотоиндуцированного магнитосопротивления $(\Delta R/R)_{ph} = [R(H) - R(0)]/R(0)$ от температуры. Результаты получены для $J = +20$ μA (рисунок 8а и 8б) и $J = -20$ μA (рисунок 8в и 8г), поскольку именно при этих величинах смещения наблюдается максимальный эффект влияния магнитного поля. Обращает на себя внимание огромная величина фотоиндуцированного магниторезистивного эффекта, $\Delta R/R$ может в несколько раз превышать 10^4 % в поле $H = 6$ кЭ, а также чрезвычайно высокая чувствительность фотоиндуцированного магниторезистивного эффекта к знаку H.

Анализируя отклик фотопроводимости на магнитное поле, было сделано предположение, что ключевую роль в оптически индуцированном магниторезистивном эффекте играют локализованные поверхностные состояния и, возможно, особенности поведения неравновесных носителей заряда в исследуемом устройстве. Появление положительного МС можно понять, если предположить, что магнитное поле сдвигает энергетические уровни поверхностных центров вверх относительно потолка валентной зоны. Действительно, при определенной температуре уровень Ферми приближается к уровням поверхностных центров, пока они ниже E_F, они участвуют в оптических переходах, и фотоэлектроны обеспечивают высокую проводимость МДП перехода и устройства в целом. За счет сдвига в магнитном поле уровни центров оказываются выше E_F, захватывают дырки и, тем самым, выключаются из процесса генерации фотоэлектронов. Проводимость перехода и устройства в целом падает (R_{ph} растет).

В заключении диссертации крастко сформулированы основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Обнаружен эффект переключения токовых каналов между слоями структуры Fe/SiO_2/p-Si. Установлено, что особенности транспортных свойств определяются переходом метал/диэлектрик/полупроводник с барьером Шоттки, который формируется на границе раздела SiO_2/p-Si. Показано, что эффект положительного магнитосопротивления в исследуемых структурах обусловлен механизмом слабой локализации, имеющим место при протекании тока в объеме полупроводника.
2. Впервые обнаружен эффект отрицательного магнитосопротивления для планарного устройства изготовленного на основе структуры Fe/SiO_2/p-Si. Установлено, что отрицательное магнитосопротивлене связано с инверсионным слоем, который формируется в узком слое вблизи границы SiO_2/p-Si при определенных токах смещения.
3. Впервые обнаружен частотно-зависимый гигантский магниторезистивный эффект на переменном токе для планарного устройства Fe/SiO_2/p-Si. Выявлено, что особенности транспортных свойств на переменном токе обусловлены процессами перезарядки поверхностных центров на границе раздела SiO_2/p-Si. Установлено, что магнитное поле индуцирует изменение энергетической структуры уровней поверхностных состояний.
4. Впервые обнаружен оптически индуцированный гигантский магниторезистивный эффект достигающий величин 10^4 % в магнитных полях не более 2 кЭ и температуре T = 15 K. Обнаружена сильная зависимость величины оптически индуцированного гигантского магниторезистивного эффекта от смещения на структуре и направления приложенного магнитного поля. Установлено, что, как и в случае с магнитоимпедансом, данный эффект проявляется благодаря наличию поверхностных центров.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Volkov N.V., Tarasov A.S., Eremin E.V., Varnakov S.N., Ovchinnikov S.G., and Zharkov S.M. Magnetic-field- and bias-sensitive conductivity of a hybrid Fe/SiO2/p-Si structure in planar geometry // J. Appl. Phys. – 2011. – V. 109. – P. 123924.
2. Volkov N.V., Eremin E.V., Tarasov A.S., Rautskii M.V., Varnakov S.N., Ovchinnikov S.G., and Patrin G.S. Magnetic Tunnel Structures: Transport Properties Controlled by Bias, Magnetic Field, and Microwave and Optical Radiation // JMMM – 2012. – V. 324. – P. 3579–3583.
3. Volkov N.V., Tarasov A.S., Eremin E.V., Eremin A.V., Varnakov S.N., and Ovchinnikov S.G. Frequency-Dependent Magnetotransport Phenomena in a Hybrid Fe/SiO_2/p-Si Structure // J. Appl. Phys. – 2012. – V. 112. – P. 123906.
4. Volkov N.V., Eremin E.V., Tarasov A.S., Varnakov S.N., and Ovchinnikov S.G. Bias-Current and Optically Driven Transport Properties of the Hybrid Fe/SiO2/p-Si Structures // Solid State Phenomena. – 2012. – V. 190. – P. 526-529.
5. Volkov N.V., Eremin E.V., Tarasov A.S., Varnakov S.N., and Ovchinnikov S.G. Controlled channel switching in hybrid tunnel structures // IV Euro-Asian Symposium “Trends in MAGnetism”: Nanospintronics (EASTMAG – 2010), Abstracts, Ekaterinburg, Russia. – 2010. – P.200.
6. Volkov N.V., Eremin E.V., Tarasov A.S., Varnakov S.N., and Ovchinnikov S.G. Bias-current and optically driven transport properties of the hybrid Fe/SiO_2/p-Si structures // Moscow International Symposium on Magnetism (MISM2011), Abstract Book, Moscow, Russia. – 2011. – P. 109.
7. Волков Н.В., Тарасов А.С., Еремин Е.В., Еремин А.В., Варнаков С.Н., и Овчинников С. Г. Гибридные структуры ферромагнетик/диэлектрик/ полупроводник: магнитосопротивление, магнитоимпеданс, фотоэлектрический эффект // XVI Международный Симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника», Сборник трудов, Нижний Новгород, Россия. — 2012. –Т.1. – С. 102.

8. Volkov N.V., Tarasov A.S., Eremin E.V., Eremin A.V., Varnakov S.N., and Ovchinnikov S.G. Magnetically Driven Electron Transport in Fe/SiO2/p-Si Hybrid Nanostructures// Joint European Symposia on Magnetism (JEMS2012), Book of Abstracts, Parma, Italy. – 2012. – P. 80.
9. Волков Н.В., Тарасов А.С., Еремин А.В., Варнаков С.Н., Овчинников С. Г., Густайцев А.О., Бондарев И.А. Спин-зависимый электронный транспорт в гибридных структурах с участием локализованных поверхностных состояний // XVII Международный Симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника», Сборник трудов, Нижний Новгород, Россия. — 2013. –Т.1. – С. 101.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fert A. The origin, development and future of spintronic // UFN. – 2008. – V.178. – N.12. – P. 1336.
2. Грюнберг П.А. От спиновых волн к гигантскому магнетосопротивлению и далее // УФН. – 2008. – Т. 178. Вып.12. С. 1349-1358.
3. Jansen R. Silicon spintronics // Nature Materials. – 2012. – V.11. – P. 400–408.
4. Jansen R., Dash S. P., Sharma S., and Min B. C. Silicon spintronics with ferromagnetic tunnel devices// Semicond. Sci. Technol. – 2012. – V.27. – P. 083001.
5. Kanoun M., Benabderrahmane R., Duluard C., Baraduc C., Bruyant N., Bsiesy A., and Achard H. Electrical study of ferromagnet-oxide-semiconductor diode for a magnetic memory device integrated on silicon// Appl. Phys. Lett. – 2007. – V.90. – P. 192508.
6. Barik S. K., and Mahendiran R. Anomalous alternating current magnetoresistance in $La_{0.5}Ca_{0.5}Mn_{1-x}Ni_xO_3$ (x=0.04) // J. Appl. Phys. – 2011. – V.109. – P. 07D724.
7. Kurebayashi H., Steinmuller S. J., Laloë J. B., Trypiniotis T., Easton S., Ionescu A., Yates J. R., and Bland J. A. C. Initial/final state selection of the spin polarization in electron tunneling across an epitaxial Fe/GaAs(001) interface // Appl. Phys. Lett. – 2007. – V.91. – P. 102114.
8. Sze S.M. Semiconductor Devices // Wiley, New York, 1985.