

На правах рукописи



Смоляков Дмитрий Александрович

МАГНИТОТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА ГИБРИДНЫХ  
СТРУКТУР  $\text{Fe}/\text{SiO}_2/\text{p-Si}$  и  $\text{Mn}/\text{SiO}_2/\text{n-Si}$

01.04.11 – физика магнитных явлений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук

Красноярск 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении

«Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН) Обособленном подразделении «Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук» (ИФ СО РАН)

Научный руководитель:

**Волков Никита Валентинович**, доктор физико-математических наук, профессор, директор Института физики им. Л.В. Киренского, Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук».

Официальные оппоненты:

**Пудонин Фёдор Алексеевич**, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, и.о. зав. лабораторией физики неоднородных систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физический Институт им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН), г.Москва

**Миляев Михаил Анатольевич**, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории электрических явлений Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, г. Санкт-Петербург

Защита состоится «\_\_\_\_» 2017 г. в \_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 003.075.01 Федерального государственного бюджетного научного учреждения ФИЦ КНЦ СО РАН, ИФ СО РАН, по адресу: 660036 г. Красноярск Академгородок, 50, строение № 38.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФ СО РАН и на сайте <http://ksc.krasn.ru>

Автореферат разослан "\_\_\_\_" 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета доктор физ.-мат.наук



Втюрин А.Н.

**Актуальность темы.** С развитием современной науки, перед исследователями в наши дни ставится огромное количество задач. Чаще всего эти задачи представляют собой поиск, изготовление и исследование новых материалов и структур для нужд современных областей производства. Однако, помимо этого, требуется совершенствование и развитие уже существующих устройств за счет применения новых принципов и идей. Именно поэтому последние десятилетия не утихает интерес вокруг новой области физики магнитных явлений – спинtronики. Главная цель данной науки – создание устройств электроники, в которых будет использоваться не только заряд, но и спин электрона. Такая цель вызывает ряд проблем, которые приходится решать в спинtronике: создание спин поляризованного тока, спиновая инжекция, спиновая аккумуляция и релаксация, спиновое детектирование, а особенно важно эффективное управление спиновым состоянием.

Несмотря на описанные выше проблемы, на сегодняшний день благодаря спинtronике уже реализованы устройства магнитной памяти и сенсоры на основе эффекта магнитосопротивления. А если принимать в расчет, что подобные созданные устройства, могут быть построены при использовании эффекта магнитоимпеданса, что делает их более чувствительными к магнитному полю, то исследования в данном направлении имеют высокую актуальность на сегодняшний день.

Для реализации задач спиновой электроники кажутся очень перспективными гибридные наноструктуры, особенно на основе кремния. Например, это структуры, состоящие из полупроводника и магнитного материала. Для полупроводников хорошо отработана технология производства, а магнитный материал обладает огромным потенциалом управления электронным транспортом, манипулируя спиновым состоянием электронов или используя спиновый транспорт. На сегодняшний день, полупроводниковая электроника имеет широкое применение, и таким образом, интеграция устройств спинtronики на основе кремния будет иметь больший успех, проще в осуществлении и

поспособствует выходу полупроводниковых приборов на качественно новый уровень развития. Благодаря этому, исследование подобных структур особенно вызывает интерес и имеет огромный потенциал дальнейшего применения. Хотя стоит отметить необходимость решения такого вопроса как инжекции и экстракции спин-поляризованного тока в полупроводник и из полупроводника в гибридных структурах. Решение подобных задач может быть осуществлено за счет границы раздела ферромагнетик-полупроводник с сопротивлением, зависящим от спиновой поляризации электронного тока (например, за счет создания туннельных переходов).

Кроме того, подобные структуры могут быть использованы в высокочастотных приборах, что делает необходимым исследование их на переменном токе, то есть исследование импеданса и магнитоимпеданса.

Эффект магнитного импеданса заключается в сильном изменении полного сопротивления проводника переменному току во внешнем магнитном поле. Интерес к данному эффекту связан с обнаружением в некоторых материалах изменения импеданса в магнитном поле в более чем 2 раза. Такое значительное изменение импеданса в литературе обычно называют эффектом гигантского магнитоимпеданса (ГМИ-эффектом).

Как часто бывает в науке, открытия не получают должного внимания у современников или не достаточно точно интерпретируются. Однако, по прошествии десятилетий, с развитием технологий производства и исследовательского оборудования, эти открытия вновь попадают в поле зрения ученых и для них начинается новый виток развития. Именно такая участь была и у эффекта магнитного импеданса, обнаруженного Харрисоном еще в 30х годах прошлого века [1, 2], а развитие получившего после работ Мори в 1994 году [3]. Данная ситуация объясняется тем, что на начальном этапе исследования технология производства не позволяла получить качественные материалы и обеспечить повторяемость результатов. Помимо этого, изменение импеданса при воздействии магнитного поля было очень малым. Потому и о практическом

применении данного эффекта в производстве на тот момент не могло идти речи, хотя авторы такую возможность обозначили.

В современной же физике конденсированного состояния вещества и физике магнитных явлений исследование структур с высокой чувствительностью эффекта ГМИ к внешнему магнитному полю являются одним из бурно развивающихся направлений [4]. Уже существуют различные прототипы датчиков на основе этого эффекта, чьи преимущества в малой энергозатратности, стоимости производства и что самое главное, высокой чувствительности к внешнему магнитному полю. Именно поэтому очень важен дальнейший научный поиск в этой области.

**Цель работы.** Изучение явлений магнитозависимого электронного транспорта в гибридных структурах  $Fe/SiO_2/n-Si$ ,  $Mn/SiO_2/p-Si$  и простейших устройствах в виде диода с барьером Шоттки на их основе.

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

1. Исследовать поведение импеданса и магнитоимпеданса структуры  $Fe/SiO_2/n-Si$  и устройства  $Fe/SiO_2/n-Si$  на ее основе в широком диапазоне температур, при различных величинах внешнего магнитного поля и различных частотах прикладываемого переменного напряжения.
2. По аналогии исследовать поведение импеданса и магнитоимпеданса структуры  $Mn/SiO_2/p-Si$  и устройства  $Mn/SiO_2/p-Si$  на ее основе в широком диапазоне температур, для различных величин внешнего магнитного поля и различных частот прикладываемого переменного напряжения.
3. Изучить влияние допирования кремния на магнитотранспортные и магнитоимпедансные свойства для структур  $Fe/SiO_2/n-Si$  и  $Mn/SiO_2/p-Si$ .
4. Определить влияние выбора материала слоя металла в гибридных структурах  $Fe/SiO_2/n-Si$  и  $Mn/SiO_2/p-Si$  на транспортные и магнитотранспортные свойства данных структур.

**Научная новизна.**

1. Обнаружены особенности, ниже 40К на температурной зависимости в виде пика реальной  $R(\Gamma)$  и ступени мнимой  $X(\Gamma)$  частей импеданса для структур Fe/SiO<sub>2</sub>/n-Si и Mn/SiO<sub>2</sub>/p-Si. Воздействие внешнего магнитного поля  $H$ , проявляется как сдвиг особенностей в область более высоких температур. Так же было исследовано влияние напряжения смещения  $V_b$  на диоде и обнаружено различие в отклике на него в зависимости от типа подложки кремния.

2. Для Fe/SiO<sub>2</sub>/n-Si при частотах переменного тока от 10Гц до 1МГц было обнаружено, что магнитосопротивление реальной части импеданса  $MR$  достигает 300%, а мнимой  $MX$  600%. Для Mn/SiO<sub>2</sub>/p-Si значение  $MR$  достигает 200%.

3. Данные особенности были объяснены наличием поверхностных центров на границе диэлектрик-полупроводник SiO<sub>2</sub>/n(p)-Si и процессами их перезарядки, идущими посредством прямого процесса испускания-захвата электронов с участием зоны проводимости.  $E_e$ . Влияние внешнего магнитного поля  $H$ , сводится к сдвигу уровней энергии поверхностных центров  $E_s$  в область более высоких энергий. Сдвиг особенностей приложенном смещении так же хорошо согласуется с предложенным нами механизмом.

4. Было обнаружено сильное влияние смещения на структуру Mn/SiO<sub>2</sub>/p-Si. При смещениях выше определенного порогового значения, магнитосопротивление на переменном токе увеличилось от 200 % до  $10^6$  % и для самых низких частот достигает  $10^7$ . Магнитосопротивление на постоянном токе имеет значения до  $10^8$  %. Такие большие значения связаны с возникновением явления ударной ионизации, которое подавляется внешним магнитным полем.

5. На основе проделанных исследований, было разработано и запатентовано устройство, представляющее собой МДП-структуре в виде диода на базе структуры Fe/SiO<sub>2</sub>/n-Si, основанное на эффекте магнитоимпеданса.

**Научная и практическая значимость.** В результате проделанных исследований, были получены данные, которые позволяют дополнить производство магниточувствительных элементов полупроводниковой электроники новыми образцами. Принцип действия этих устройств основан на

эффекте магнитоимпеданса, возникающем за счет участия поверхностных центров на границе диэлектрик/полупроводник и процессами их перезарядки. Управление магнитосопротивлением такой структуры возможно за счет частоты переменного тока, внешнего магнитного поля и напряжения смещения. Такие устройства могут быть особенно полезны в областях, где играет важную роль такой критерий как чувствительность к магнитному полю и в изготовлении высокочастотных приборов.

**Положения, выносимые на защиту.**

1. Результаты исследования транспортных и магнитотранспортных свойств гибридных структур Fe/SiO<sub>2</sub>/p-Si и Mn/SiO<sub>2</sub>/p-Si на переменном токе, а также в условиях приложенного внешнего магнитного поля и напряжения смещения.
2. Описание механизмов магнитосопротивления на переменном токе, а также возникновение эффекта гигантского магнитосопротивления при воздействии напряжения смещения.

**Апробация работы.** Основные результаты работы были доложены в виде устных и постерных докладов. В том числе: «6-ом Московском международном симпозиуме по магнетизму - MISM-2014» (г. Москва, Россия, 2014г.), «Spin physics, spin chemistry and spin technology - SPCT-2015» (Санкт-Петербург, Россия, 2015г.), «VI Euro-Asian Symposium Trends in magnetism» (г. Красноярск, Россия, 2016 г.). Некоторые результаты исследования были представлены на семинарах и докладах в Институте физики СО РАН.

**Публикации.** Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 13 работах, в том числе 4 статьях в рецензируемых журналах, 9 работ в трудах конференций и 1 свидетельстве о регистрации патента.

**Личный вклад автора** заключается в проведении всех экспериментов по исследованию гибридных структур при различных температурных условиях и внешних воздействиях. Обработке полученных результатов и построении качественной модели. Автором диссертации проведен анализ и обобщение полного набора экспериментальных и теоретических данных, а также

интерпретация полученных результатов.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 113 страницах машинописного текста, включая 40 рисунков. Список цитируемой литературы содержит 105 наименований.

**Во введении** рассмотрено научное значение и новизна исследований по теме диссертационной работы. Обоснована актуальность, дана общая характеристика работы, сформулированы цели диссертации.

**Первая глава** посвящена описанию явления магнитоимпеданса, его природы и необходимых условий для его возникновения. Кратко рассказана история открытия этого эффекта и приведен обзор работ о его исследованиях в наши дни. Рассмотрены особенности магнитного импеданса в различных материалах: проводах, лентах, тонких пленках и многослойных структурах. Так же приведен обзор различных устройств, реализованных за счет данного эффекта, их достоинствах и недостатках, а так же о перспективности и возможности развития подобных устройств в дальнейшем..

**Во второй главе** представлено описание технологии получения гибридных структур на основе кремния. Структуры были изготовлены лабораторией Физики Магнитных Явлений ИФ СО РАН. В качестве подложки для образца  $Fe/SiO_2/n-Si$  была взята пластина кремния, легированная фосфором и, следовательно, обладающая проводимостью n-типа (удельное сопротивление – 7.5 Ohm\*cm). В свою очередь, при изготовлении структуры  $Mn/SiO_2/p-Si$  использовалась подложка p-типа, которая была легирована бором и обладает удельным сопротивлением 5 Ohm\*cm. Предварительно поверхность подложки очищалась путем химического травления и термических обработок. На ее поверхности химическим методом был создан слой оксида толщиной около 1нм. Далее на слое диэлектрика формировался слой металла. Пленка получалась методом

термического испарения в сверхвысоком вакууме при комнатной температуре. Были получены структуры с толщиной пленки Fe равной 10нм, толщина пленки Mn у полученных образцов составляет около 15нм. Измерения проводились двухконтактным методом. Контакты были нанесены на пленке металла и на нижней части подложки кремния. Таким образом, были изготовлены простейшие устройства в виде МДП-диода с барьером Шоттки. Характеризация структуры образцов проводилась методами электронной микроскопии. Так же в данной главе описана экспериментальная установка для исследования транспортных и магнитотранспортных исследований на переменном токе.

**В третьей главе** приведены результаты исследования транспортных и магнитотранспортных свойств структуры Fe/SiO<sub>2</sub>/n-Si в широком диапазоне температур(4-350К). На температурных зависимостях реальной части импеданса в интервале низких температур от 10 до 30К наблюдается интенсивный пик  $R(T)$ .

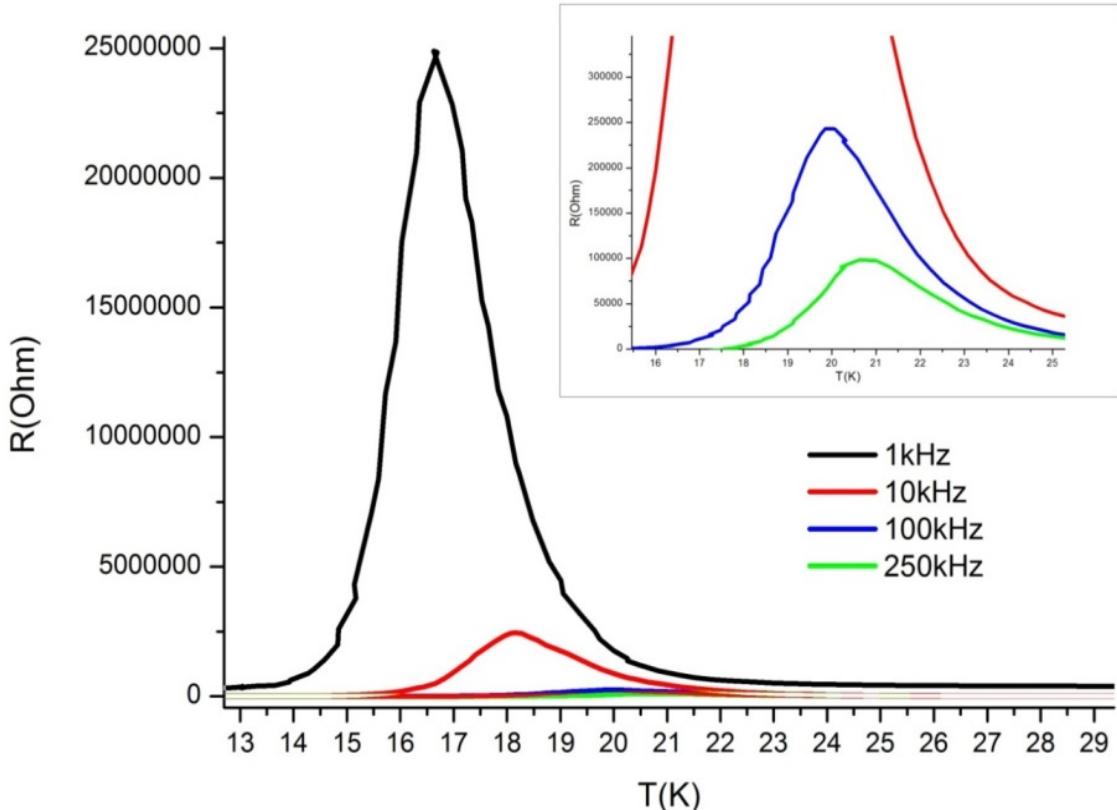


Рисунок 1 - Температурная зависимость реальной части импеданса при воздействии переменного напряжения с частотами 1, 10, 100 и 250 кГц.

При увеличении частоты переменного тока пик сдвигается в область более

высоких температур и уменьшается по интенсивности (рисунок 1). Данная особенность связывается нами с задержкой в процессах перезарядки поверхностных центров, локализованных вблизи границы оксид/полупроводник. Эти процессы обусловлены воздействием переменного напряжения  $V_{ac}$  на МДП структуру, что проявляется как колебания уровня Ферми через энергетические уровни поверхностных центров. Природа особенностей на температурной зависимости предполагает, что положение пика  $R(T)$  будет зависеть от частоты переменного напряжения. Процесс перезарядки следует рассматривать как последовательность процессов захвата-испускания электронов и туннелирования их из металлического электрода в поверхностный слой и обратно. Что касается быстрого уменьшения высоты пика  $R(T)$  с увеличением частоты переменного напряжения  $V_{ac}$ , то, по-видимому, это связано с особенностями функции плотности энергии поверхностных состояний  $N(E)$  в запрещенной зоне полупроводника. При воздействии внешнего магнитного поля на структуру, мы наблюдаем сдвиг пика  $R(T)$  в более высокие температуры. Для величины магнитного поля 1Т этот сдвиг может достигать 2К. Данный эффект следует рассматривать с позиций влияния магнитного поля на энергетическую структуру поверхностных состояний, локализованных на границе  $SiO_2/n-Si$  (рисунок 2). При воздействии внешнего магнитного поля энергетические уровни поверхностных центров  $E_g$  сдвигаются в сторону от зоны проводимости полупроводника  $E_c$ . В этом случае уровень Ферми, который в полупроводнике n-типа при понижении температуры сдвигается в сторону зоны проводимости, «достигнет» положения энергетических уровней поверхностных состояний при более высоких температурах, чем в отсутствие внешнего магнитного поля.

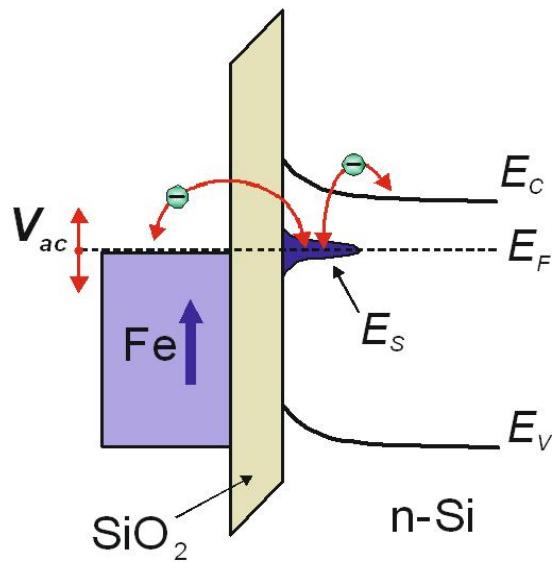


Рисунок 2 - Схематичная зонная диаграмма диода Шоттки Fe/SiO<sub>2</sub>/p-Si содержащего уровни интерфейсных центров (Es). Переменное напряжение (Vac) приложенное к МДП-переходу вызывает осцилляции уровня Ферми (Ef) на ФМ электроде, в результате чего происходит пересечение уровня Ферми и уровней интерфейсных центров.

Поэтому и пик  $R(T)$  в магнитном поле также наблюдается при более высоких температурах (рисунок 3).

Воздействие напряжения смещения ( $V_s$ ) на структуру проявляется как сдвиг пика реальной части импеданса, за счет изгиба краев энергетических зон на границе раздела диэлектрик/полупроводник. Положение энергетических уровней поверхностных состояний изменяется, следуя за смещением краев разрешенных зон полупроводника, в то время как положение уровня Ферми остается неизменным. Таким образом, за счет воздействия магнитного поля и напряжения смещения магнитосопротивление структуры может достигать 400%. Для примерной оценки положения уровней энергии поверхностных состояний в запрещенной зоне и величину смещения  $E_s$  в магнитном поле можно воспользовавшись простым соотношением  $\ln(\omega) = \ln(1/\tau_0) - E_s/(k_B T_p)$ , где  $T_p$  позиция пика  $R(T)$  при фиксированной частоте  $\omega$ . Выполнив подгонку

экспериментальной зависимости  $\ln(\omega)$  к подгоночной линии получим оценку для  $E_s$ .

по прямой линии, из наклона

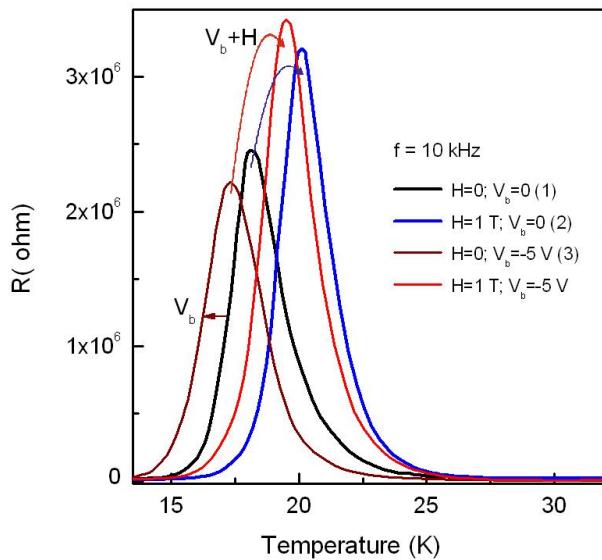


Рисунок 3 - Температурные зависимости реальной части импеданса  $R$  при воздействии напряжения смещения  $V_b$  на структуру, помещенную в магнитное поле 1Т и в нулевое поле, на частоте переменного напряжения  $V_{ac} = 10\text{кГц}$ .

Для положения  $E_F$  без поля и в поле из анализа находим 37.8 мЭв и 42.0 мЭв относительно  $E_F$ . Величина смещения энергетических уровней поверхностных состояний в магнитном поле  $\sim$  мЭв. Для сравнения можно привести величину Зеймановского расщепления уровней, что для  $S = \frac{1}{2}$  и магнитного поля 1Т не превышает 0.06 мЭв.

**Четвертая глава** посвящена исследованию транспортных свойств структуры Mn/SiO<sub>2</sub>/p-Si. Как и в предыдущей главе, на температурной зависимости  $R(T)$  наблюдается такая же особенность в виде пика. Данная особенность при воздействии внешнего магнитного поля  $H$ , сдвигается в область более высоких температур примерно на 2К. Помимо этого, поведение пика сильно зависит от частоты переменного сигнала  $V_{ac}$ . При ее повышении он так же сдвигается в

область более высоких температур. Причины поведения особенности объясняется в рамках модели предложенной выше. Энергия уровней поверхностных состояний составляет около 39,5 мЭв, а при воздействии внешнего магнитного поля, она меняется до 41,9 мЭв (изменения  $E_s$  в магнитном поле 1Т сдвиг превышает 2 мЭв). Однако интерес вызывает влияние напряжения смещения. Для напряжений выше критической величины  $V_b^c$ , которая в нашем случае равна примерно 2В, характер поведения  $R_{ac}(T)$  и характер влияния магнитного поля на импеданс меняется кардинально. На рисунке 4 показан пик на температурной зависимости  $R_{ac}(T)$  который наблюдается при малых смещениях  $V_b$ , сильно меняет форму, сдвигается и уменьшается по интенсивности при смещениях, выше порогового  $V_b^c$ . Данный пик практически не наблюдается уже при  $V_b > 3$  В.

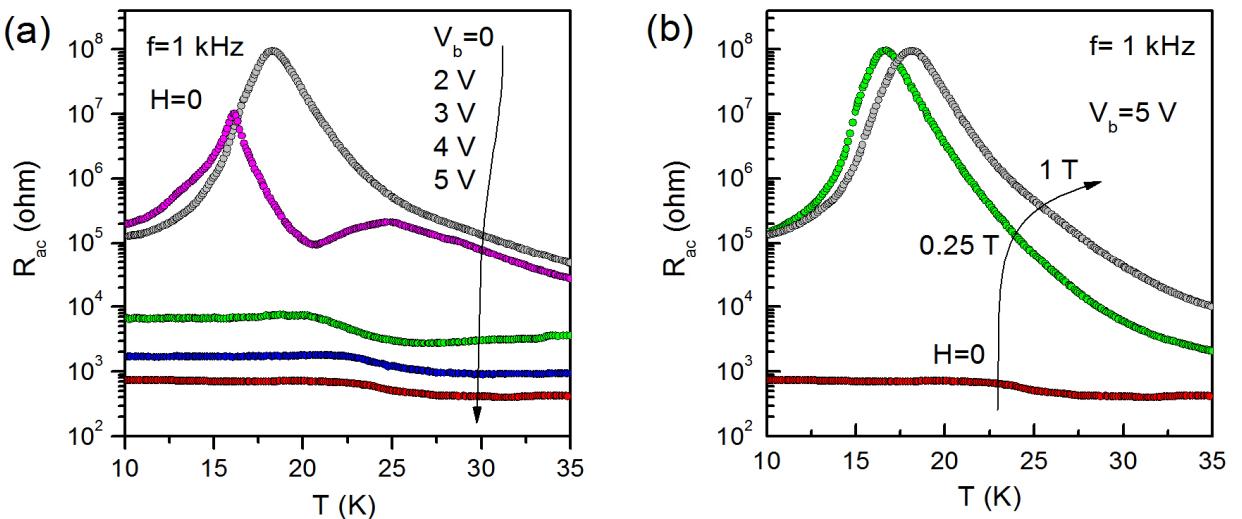


Рисунок 4 – а) Температурные зависимости реальной части импеданса с частотой переменного тока 1кГц для различных напряжений смещения. б) Температурные зависимости реальной части импеданса с частотой переменного тока 1кГц для смещения 5В при влиянии магнитного поля 0,25 и 1Т

При воздействии внешнего магнитного поля  $H$ , пик быстро восстанавливает первоначальную форму и размер. Уже при поле 250 мТл его интенсивность совпадает с пиком интенсивности при  $V_b = 0$ . Чтобы разобраться с влиянием смещения, были исследованы вольт-амперные характеристики ( $I-V$ ). Как и

следовало ожидать, ВАХ оказываются нелинейными. Для области температур 40–300 К они имеют вид, стандартный для МДП диода с барьером Шоттки и слабо меняются с изменением температуры (рисунок 5а). Это свидетельствует в пользу того, что физические механизмы транспорта носителей заряда для этого диапазона температур остаются неизменными. На рисунке 5б можно увидеть, что при температуре ниже 40 К вольт-амперные характеристики  $I$ – $V$  приобретают более сложный вид и становятся более чувствительными к влиянию внешнего магнитного поля. Это может свидетельствовать о «включении» при низких температурах дополнительных механизмов проводимости структуры. В отсутствие магнитного поля для прямого смещения на диоде при достижении порогового напряжения ( $V_b^c \approx 2$  В) наблюдается резкий рост тока на несколько порядков. При включении магнитного поля резкий скачок на ВАХ подавляется.

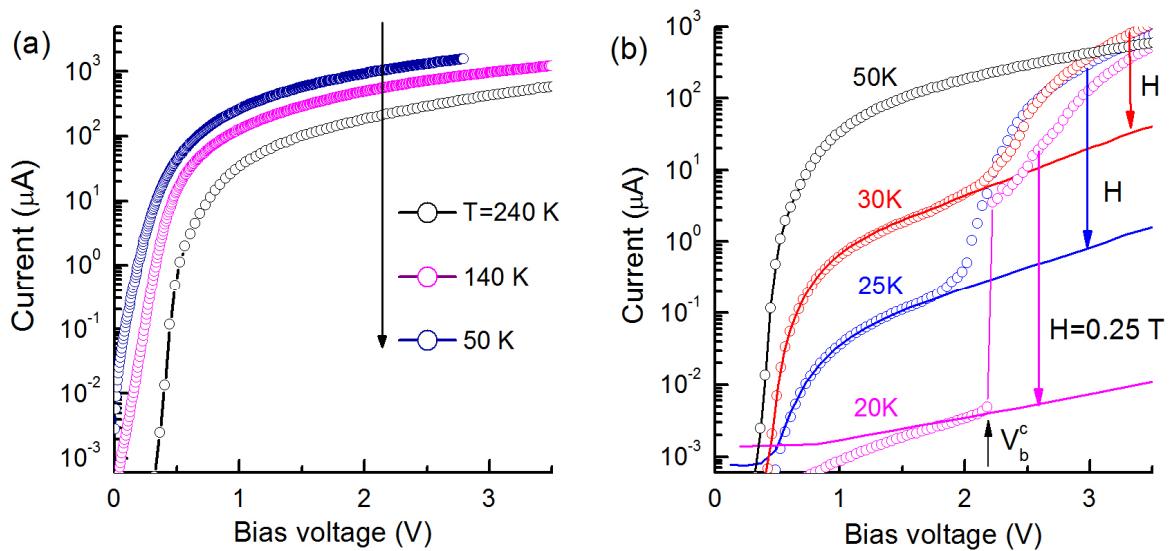


Рисунок 5 - Вольт-амперные характеристики: (а) в нулевом поле при температуре от 240К-50К, (б) в поле 0,25Т для температур ниже 50К.

Когда напряжение приложено к диоду происходит падение напряжения: на барьере Шоттки ( $V_{Sch}$ ), который сформирован на границе диэлектрик полупроводник между Si и  $SiO_2$ ; в слое диэлектрика  $SiO_2$  ( $V_i$ ); и в объеме подложки кремния Si ( $V_{Si}$ ). Таким образом, полное напряжение на диоде ( $V_{tot}$ )

может быть записано как  $V_{tot} = V_{Sch} + V_i + V_{Si}$ . Учтем плотность тока через барьер Шоттки [5], которая определяется явлением термоэлектронной эмиссии. Вклад, связанный со слоем  $SiO_2$  и с дефектами, которые формируются в этом слое структуры. Для тонкого слоя диэлектрика с дефектами является характерным выполнение закона Ома при низких напряжениях и квадратичная зависимость тока от напряжения при высоких. Это связано с энергетическими ловушками, созданными дефектами [6]. При высоких напряжениях, носители заряда приобретают энергию, достаточную для захвата этими ловушками, что приводит к объемному заряду. В результате, ток через диэлектрик становится, ограничен по зарядовому току и подчиняется зависимости, которая известна как закон Mott–Gurney. Так же, примем во внимание, что для полупроводника зависимость сопротивление  $R_{Si}$  от температуры определяется, главным образом, температурной зависимостью концентрации ( $n$ ) носителей заряда.

Из всего вышесказанного, окончательный вариант уравнения между смещением и током для исследуемой структуры может быть записано как

$$V_{tot} = \frac{IL}{S_{eff} \cdot n(T) \mu q} + \frac{k_B T}{q} \ln \left( \frac{I}{S_{eff} J_0} + 1 \right) + \sqrt{\frac{8Id^3\theta}{9S_{eff}\epsilon\mu}}$$

где  $J_0 = A^* T^2 \exp(-q\phi/k_B T)$ ,  $L$  - толщина подложки  $Si$ ,  $S_{eff}$  - активная область перехода,  $\mu$  - подвижность заряда,  $\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость слоя диэлектрика,  $d$  - толщина слоя  $SiO_2$ ,  $\theta$  - равно отношению захваченных носителей ловушками к общему числу инжектированных,  $A^*$  - эффективная константа Ричардсона,  $\phi$  - высота барьера Шоттки, и  $\eta$  - фактор идеальности барьера, значение которого, как правило, близко к единице, и мы для дальнейших оценок будем использовать значение  $\eta = 1$ .

На рисунке 6 представлен пример аппроксимации экспериментально полученной  $I-V$  характеристики при  $T = 50\text{ K}$  данным выражением с параметрами, которые являются вполне реалистичными для нашей структуры.

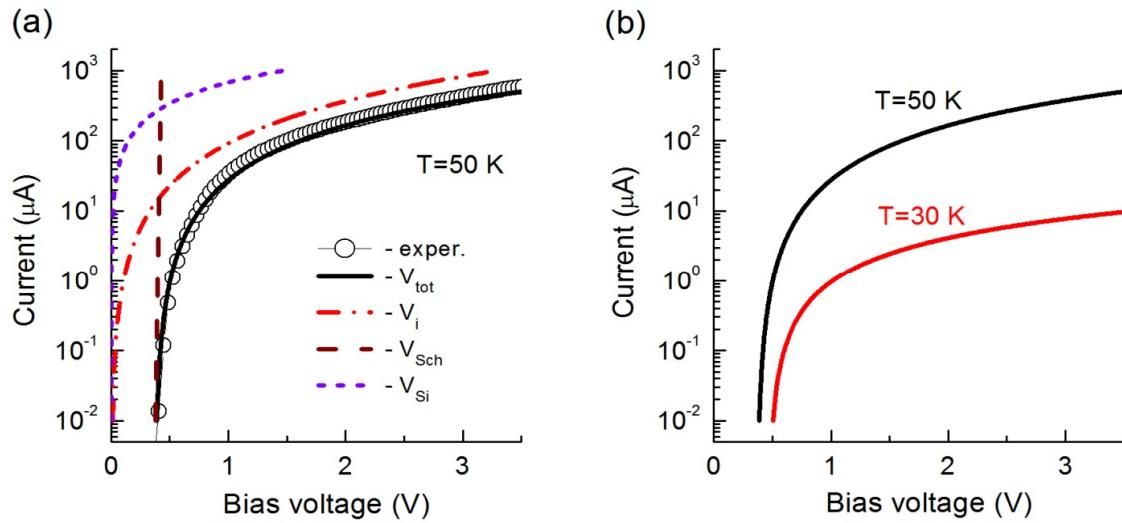


Рисунок 6 - Расчетные и экспериментальные вольт-амперные характеристики (а) при  $50\text{ K}$ , (б) для температур  $50\text{ K}$  и  $30\text{ K}$ .

Как видно из рисунка, наше теоретическое приближение достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными. Теперь обратимся к особенности, которая возникает на  $I-V$  зависимостях ниже  $40\text{ K}$  при  $V_b^c$ . Есть все основания предполагать, что резкий рост тока выше порогового напряжения и основные особенности в поведении транспортных свойств при  $V_b > V_b^c$  связаны автокаталитическим процессом ударной ионизации мелких акцепторов бора в объеме полупроводника. Когда приложены большие значения смещений, носители приобретают кинетическую энергию превышающую энергию ионизации акцепторных примесей, возникает процесс ударной ионизации. Поскольку энергия ионизации ( $\sim E_A$ ) около  $40\text{ мЭв}$ , пробой возникает уже в области нескольких  $\text{V}/\text{см}$  и сохраняется пока все примеси находятся в состоянии ионизации. Выше, исследуя поведение импеданса структуры, мы показали, что в магнитном поле происходит сдвиг  $E_A$  в сторону больших энергий ( $\Delta E_A^H$ ). На качественном уровне, очевидно, что увеличение  $E_A$  по отношению к валентной

зоне приводит к росту энергии активации ударной ионизации, т.е., процесс будет инициироваться при больших значениях  $F_B$  ( $V_b^c$ ). Магнитное поле может влиять на процессы туннелирования, тем самым влиять на распределение электрического поля структуры [7].

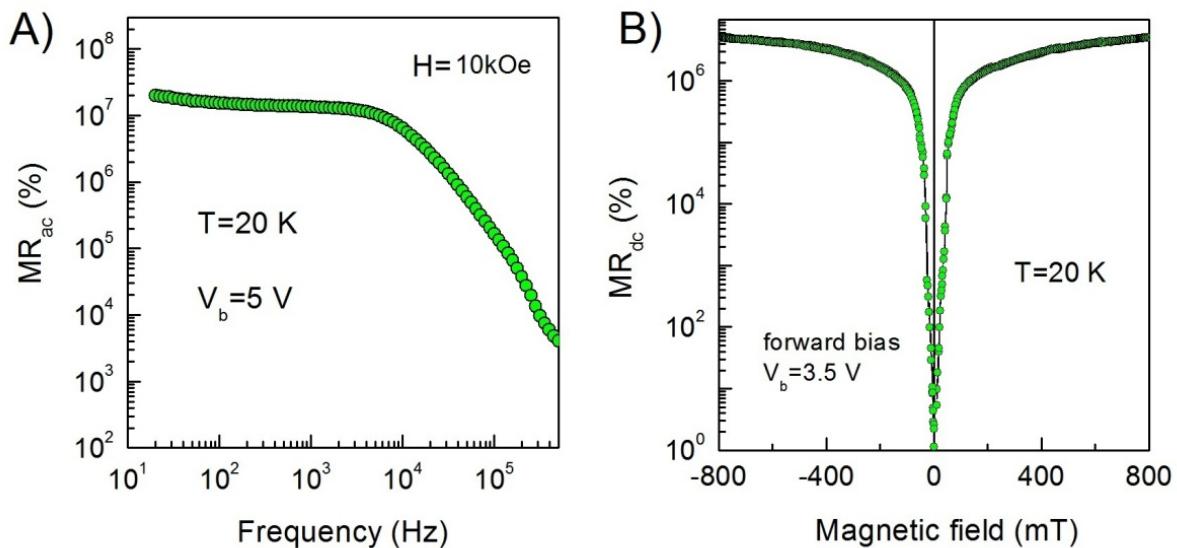


Рисунок 7 - Зависимости магнитосопротивления при температуре 20К и воздействии напряжения смещения: а) частотная зависимость на переменном токе, б) полевая зависимость на постоянном токе.

Кроме того, обсуждается механизм, связанный с действием силы Лоренца. Когда приложено магнитное поле, сила Лоренца отклоняет носители заряд от траектории движения, что приводит к возникновению высокой вероятности неупругого взаимодействия, что в свою очередь вызывает понижение кинетической энергии носителей и как результат подавление процесса ударной ионизации.

Благодаря включению процесса ударной ионизации мы можем наблюдать значения магнитосопротивления достигающие на переменном токе  $10^6 \%$ , на постоянном токе до  $10^8 \%$  (рисунок 7).

## Основные результаты работы.

1. Для структуры Fe/SiO<sub>2</sub>/n-Si при воздействии переменного тока было обнаружено магнитосопротивление  $MR$  достигающее 400%, а  $MX$  600%. Для Mn/SiO<sub>2</sub>/p-Si значение  $MR$  достигает 200%.

2. Данные особенности в рамках предложенной нами модели объясняются наличием поверхностных центров на границе диэлектрик-полупроводник SiO<sub>2</sub>/n(p)-Si, процессами их перезарядки и влиянием на них внешнего магнитного поля  $H$  и напряжения смещения.

3. Было обнаружено магнитосопротивление на переменном токе для структуры Mn/SiO<sub>2</sub>/p-Si достигающее значений  $10^6$  %, на постоянном токе до  $10^8$  %.

4. Данный эффект связан с влиянием смещения на диод, выше определенного порогового значения и возникновением явления ударной ионизации, которое подавляется внешним магнитным полем.

5. Предложена качественная модель, описывающая представленные эффекты.

6. В результате проделанной работы, был разработан и запатентован магниточувствительный элемент на основе эффекта магнитоимпеданса, представляющий собой МДП-структуре в виде диода на базе структуры Fe/SiO<sub>2</sub>/n-Si.

### **Основные результаты диссертации опубликованы в работах:**

1. N.V. Volkov, A.S. Tarasov, D. A. Smolyakov, A. O. Gustaitsev, V. V. Balashev, and V. V. Korobtsov. The bias-controlled giant magnetoimpedance effect caused by the interface states in a metal-insulator-semiconductor structure with the Schottky barrier // Applied Physics Letters. – 2014. – № 104. – С. 222406 (1-5).

2. N.V. Volkov, A.S. Tarasov, D.A. Smolyakov, S.N. Varnakov, S.G. Ovchinnikov. Bias-voltage-controlled ac and dc magnetotransport phenomena in hybrid structures // Journal of Magnetism and Magnetic. – 2015. – № 383. – С. 69 – 72.

3. D. A. Smolyakov, A.S. Tarasov, A. O. Gustaitsev and N.V. Volkov. The Bias-

Controlled Magnetoimpedance Effect in a MIS Structure // Solid State Phenomena. – 2015. – № 233. – C. 451 – 455.

4. N. V. Volkov, A. S. Tarasov, D. A. Smolyakov, A. O. Gustaitsev, M. V. Rautskii, A. V. Lukyanenko, M. N. Volochaev, S. N. Varnakov, I. A. Yakovlev and S. G. Ovchinnikov. Extremely high magnetic-field sensitivity of charge transport in the Mn/SiO<sub>2</sub>/p-Si hybrid structure // AIP Advances. – 2017. – № 7. – C. 015206 (1-13).
5. D.A. Smolyakov, A.O. Gustaitsev, N.V. Volkov. Bias-controlled magnetoimpedance effect in a MIS structure // Moscow International Symposium of Magnetism (Moscow, Russia). 2014. – C. 541.
6. A.O. Gustaitsev, D.A. Smolyakov, N.V. Volkov. Impedance of the Fe/SiO<sub>2</sub>/n-SI hybrid structure in a high magnetic field // Moscow International Symposium of Magnetism (Moscow, Russia). 2014. – C. 538.
7. N.V. Volkov, A.S. Tarasov, D.A. Smolyakov, S.N. Varnakov, S.G. Ovchinnikov. Bias-voltage-controlled ac and dc magnetotransport phenomena in hybrid structures // Moscow International Symposium of Magnetism (Moscow, Russia). 2014. – C. 315.
8. N.V. Volkov, A.S. Tarasov, D.A. Smolyakov, M.V. Rautskii, S.N. Varnakov, and S.G. Ovchinnikov. Giant magnetotransport effects driven by bias and optical irradiation in silicon-based // Spin physics, spin chemistry and spin technology (St. Petersburg, Russia). 2015. – C. 36.
9. N.V. Dorofeev, I.A. Bondarev, A.S. Tarasov, D.A. Smolyakov, S.N. Varnakov and N.V. Volkov. Magnetotransport Properties of the Mn/SiO<sub>2</sub>/p-Si Hybrid Structures // Spin physics, spin chemistry and spin technology (St. Petersburg, Russia). 2015. – C. 69.
10. A.S. Tarasov, D.A. Smolyakov, A.V. Lukyanenko, S.N. Varnakov, S.G. Ovchinnikov and N.V. Volkov. The dc Magnetotransport Properties of the Mn/SiO<sub>2</sub>/p-Si Diode // Spin physics, spin chemistry and spin technology (St. Petersburg, Russia). 2015. – C. 173.
11. D. A. Smolyakov, N. V. Volkov, A. S. Tarasov, A. O. Gustaitsev, S. N. Varnakov and I. A. Bondarev. Magnetotransport effects in the Mn/SiO<sub>2</sub>/p-Si Hybrid Structure //

- VI Euro-Asian Symposium Trends in magnetism (Krasnoyarsk, Russia). 2016. – С. 77.
12. A. O. Gustaitsev, D. A. Smolyakov, A. S. Tarasov, S. N. Varnakov and N. V. Volkov. Magnetoimpedance of Silicon-Based Hybrid Structures with a Schottky Barrier // VI Euro-Asian Symposium Trends in magnetism (Krasnoyarsk, Russia). 2016. – С. 92.
13. Пат. 2561232 Рос. Федерации, МПК H01L43/00. Чувствительный элемент на основе магнитоимпеданса / Д. А. Смоляков, Н. В. Волков, А. О. Густайцев, А. С. Тарасов; Заявитель и патентообладатель ФГБУН ИФ им. Л.В. Киренского СО РАН. – № 2014124563/28; заявл. 17.06.2014; опубл. 27.08.2015.

### **Список цитируемой литературы:**

1. Harrison E.P., Turney G.L., Rowe H. An impedance magnetometer // Nature. – 1935. – № 135. – С. 961.
2. Harrison E.P., Turney G.L., Rowe H., Gollop H. The electrical properties of high permeability wires carrying alternating current // Proc. Roy. Soc. – 1936. – Т.157. – № 891. – С. 451 – 479.
3. Panina L.V., Mohri K., Bushida K., Noda M. Giant magnetoimpedance and magneto-inductive effects in amorphous alloys // J. Appl. Phys. – 1994. – Т. 76. – С. 6198 – 6203.
4. Антонов А.С., Гадецкий С.Н., Грановский А.Б., Дьячков А.Л., Парамонов В.П., Перов Н.С., Прокошин А.Ф., Усов Н.А., Лагарьков А.Н. Гигантский магнитоимпеданс в аморфных и нанокристаллических мультислоях // ФММ. – 1997. – Т. 83. – № 6. – С. 61 – 71.
5. S.M. Sze. Semiconductor Devices // Wiley. – New York – 1985.
6. Lampert, M. A. Simplified theory of space-charge-limited currents in an insulator with traps // Phys. Rev. – 1956. – № 103. – С. 1648–1656.
7. L.Y.L. Shen and J.M. Rowell. Zero-Bias Tunneling Anomalies - Temperature, Voltage, and Magnetic Field Dependence // Phys. Rev. – 1968. – № 165. – С. 566 – 577.