

Отзыв

официального оппонента на диссертационную работу Смолякова Дмитрия Александровича “Магнитотранспортные свойства гибридных структур $\text{Fe/SiO}_2/\text{p-Si}$ и $\text{Mn/SiO}_2/\text{n-Si}$ ”, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений

Диссертационная работа Смолякова Д.А. посвящена исследованию явлений магнитоиндуцированного электронного транспорта в гибридных структурах на основе кремния $\text{Fe/SiO}_2/\text{n-Si}$, $\text{Mn/SiO}_2/\text{p-Si}$. Тема диссертации относится к интенсивно развивающейся области физики твердого тела – спинтроники. Особый импульс исследованиям в данном направлении придает огромный прикладной потенциал спинтроники. В связи с этим становятся актуальными исследования явлений магнетизма в системах пониженной размерности – наноструктурах, которые становятся основой современной электронной инженерии. И здесь важнейшим и актуальным вопросом становится интегрирование магнитных систем в полупроводниковые структуры, поскольку в этом случае можно задействовать спин носителей и, тем самым, существенно расширить функциональные возможности полупроводниковых наноструктур. Поэтому много усилий прилагается для создания и изучения гибридных систем, исследования в них спин поляризованного тока, спиновой инжекции и аккумуляции. Особый интерес представляют гибридные структуры, которые могут быть использованы в высокочастотных приборах, что делает необходимым проведение исследований высокочастотных свойств таких структур, в том числе импеданса и магнитоимпеданса.

На сегодняшний день уже реализованы устройства магнитной памяти и сенсоры на основе эффекта магнитосопротивления. Такие устройства, могут быть построены и при использовании эффекта магнитоимпеданса, что делает их более чувствительными к магнитному полю. Все сказанное свидетельствует об актуальности темы диссертационной работы Смолякова Д.А.

Диссертационная работа Смолякова Д.А. состоит из введения, обзорной главы, трех оригинальных глав, заключения и списка литературы.

Во введении рассмотрено научное значение и новизна исследований по теме диссертационной работы. Обоснована актуальность, дана общая характеристика работы, сформулированы цели и задачи, приведены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена описанию явления магнитоимпеданса, его природы и условий возникновения, приведен обзор работ о его исследованиях в наши дни. Рассмотрены особенности магнитного импеданса в различных материалах. Описаны различные устройства, реализованные за счет данного эффекта, их достоинства и недостатки, а так же перспективы развития подобных устройств в дальнейшем. Здесь необходимо отметить ясность изложения автором современного состояния исследований явления импеданса.

Во второй главе представлено описание технологии получения гибридных структур на основе кремния. Изготовлены структуры $\text{Fe/SiO}_2/\text{n-Si}$ и $\text{Mn/SiO}_2/\text{p-Si}$ и простейшие устройства в виде МДП-диода с барьером Шоттки на их основе. Проведена характеристика полученных образцов методами электронной микроскопии. Так же в данной главе описана экспериментальная установка для исследования транспортных и магнитотранспортных свойств на переменном токе.

В третьей главе приводятся результаты исследования структуры $\text{Fe/SiO}_2/\text{n-Si}$. Обнаружены особенности, возникающие ниже 40K на температурной зависимости в

30.05.2017 г.

№356-03/6215-144

виде пика реальной $R(T)$ и степени мнимой $X(T)$ частей импеданса. Данные особенности зависят от частоты переменного сигнала, при увеличении которой пик $R(T)$ сдвигается в область более высоких температур и уменьшается по интенсивности, а степень $X(T)$ меняет свою высоту. Эти эффекты объяснены автором наличием поверхностных центров на границе диэлектрик-полупроводник $\text{SiO}_2/\text{n-Si}$ и процессами их перезарядки. Внешнее магнитное поле сдвигает положение особенностей в область более высоких температур. Автором предложен механизм такого сдвига, который связывается со смещением уровней энергии поверхностных центров в область более высоких энергий. Благодаря этому, при понижении температуры (для полупроводника n-типа к зоне проводимости) уровень Ферми достигает их уже в области больших температур, что мы наблюдаем в виде сдвига особенности. При воздействии напряжения смещения $V_b = -5\text{В}$, так же происходит сдвиг особенностей на температурных зависимостях, для $V_b = 5\text{В}$ изменений не наблюдалось. Данный факт хорошо согласуется с предложенным механизмом, так как известно, что на МДП-структуре напряжение смещения приводит к изгибу краев энергетических зон на границе раздела диэлектрик/полупроводник. За счет этого, положение энергетических уровней примесных центров меняется, следуя за смещением краев разрешенных зон полупроводника, тем самым меняется и время процесса перезарядки.

Четвертая глава посвящена исследованию транспортных свойств структуры $\text{Mn/SiO}_2/\text{p-Si}$. Так же как и для случая структуры $\text{Fe/SiO}_2/\text{n-Si}$ в этих системах обнаружены особенности, возникающие ниже 40К , зависящие от частоты переменного сигнала, магнитного поля и смещения. При $V_b = 5\text{В}$, происходит сдвиг особенностей на температурных зависимостях, однако для обратного смещения $V_b = -5\text{В}$ изменений нет. Данные эффекты объясняются автором в рамках ранее предложенной модели. При достижении напряжения смещения порогового значения, особенности на температурной зависимости подавляются, но при воздействии внешнего магнитного поля снова восстанавливают свою форму. Благодаря этому наблюдается возникновение эффекта гигантского магнитоимпеданса.

Помимо этого, в данной главе представлены результаты исследований транспортных свойств МДП диода с барьером Шоттки на постоянном токе. Для области температур $40-300\text{ К}$ вольт-амперные характеристики оказываются нелинейными, имеют вид, стандартный для МДП диода с барьером Шоттки и слабо меняются с изменением температуры. Ниже 40 К вольт-амперные характеристики приобретают более сложный вид и становятся чувствительными к влиянию внешнего магнитного поля, что свидетельствует о «включении» дополнительных механизмов проводимости структуры, наблюдается резкий скачек при достижении порогового напряжения, равного 2В . Действие магнитного поля сводится к тому, что оно сдвигает это пороговое напряжение, при котором возникает особенность на вольт-амперных характеристиках. Эту особенность диссертант связывает с возникновением ударной ионизации в слое полупроводника.

В поведении ВАХ диода были рассмотрены несколько вкладов. Первый – падение сопротивления на барьере Шоттки, который сформирован на границе диэлектрик полупроводник между Si и SiO_2 . Кроме того вклад слоя диэлектрика SiO_2 в котором за счет примесей были созданы ловушки для носителей заряда. И третий, вклад подложки кремния Si , в которой при понижении температуры в районе 40 К уровень Ферми опускается ниже уровней примесных центров, благодаря чему акцепторы начинают интенсивно захватывать дырки. Концентрация основных носителей начинает быстро падать с температурой, приводя к падению тока через структуру. Эти вклады учтены при численном описании изменения напряжения на диоде. Результаты вычислений достаточно хорошо согласуются с экспериментальными

кривыми. Обнаружено магнитосопротивление на переменном токе для структуры $\text{Mn/SiO}_2/\text{p-Si}$ достигающее значений $10^6\%$, на постоянном токе до $10^8\%$.

На основе проделанных исследований, было разработано и запатентовано магниточувствительный элемент на основе эффекта магнитоимпеданса.

Хотелось бы особо отметить, что в отличие от обычных магнитных импедансных систем, где высокие значения магнитоимпеданса связаны со скин-слоем, в данной работе предлагается совершенно новый оригинальный подход, в котором явление магнитоимпеданса не связано со скин-слоем. И если стандартные импедансные системы имеют достаточно большие геометрические размеры, то предлагаемые в диссертации гибридные структуры открывают путь к миниатюризации импедансных структур. Я считаю предложенный подход к созданию гибридных импедансных систем заметным вкладом в физику магнитных явлений наноструктур.

Кроме того, хотелось бы отметить интересный факт обнаружения зависимости знака магнитоимпеданса от частоты для гибридных структур $\text{Mn/SiO}_2/\text{p-Si}$.

Как и в любом научном исследовании, в данной работе можно отметить несколько недостатков:

1. При рассмотрении влияния магнитного поля на импеданс гибридных структур предполагается, что энергетическое положение центров на границе раздела Si и SiO_2 чувствительно к воздействию внешнего магнитного поля. По моему мнению, было бы полезным провести более полные исследования физических механизмов, ответственных за «магнитную» чувствительность таких центров и условия возникновения таких центров. Кроме того, из-за того, что для интерфейсов как $\text{SiO}_2\text{-Si(p)}$ так и $\text{SiO}_2\text{-Si(n)}$ задействованы разные поверхностные центры (энергетическое положение этих центров различно), а магнитное поле существенно воздействует на эти уровни поверхностных состояний для обоих интерфейсов, желательно более подробно исследовать роль магнитного электрода (Fe или Mn) в данном явлении.
2. Для большего понимания физической природы поверхностных центров было бы полезно использовать другие способы выращивания слоев SiO_2 на Si , например, магнетронным распылением, которое существенно увеличивает плотность состояний на интерфейсе Si-SiO_2 (вплоть до 10^{13}см^{-2}). Такая работа могла бы помочь в понимании физических механизмов функционирования исследуемых гибридных структур.

Однако отмеченные недостатки ни в коей мере не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы Смолякова Д.А.. Диссертация представляет собой логически завершенную научно-исследовательскую работу на актуальную тему, выполненную на высоком научном, техническом и технологическом уровне. Представленные в диссертационной работе Смолякова Д.А. экспериментальные результаты и сделанные на их основании выводы, а также положения, выносимые на защиту, обоснованы и достоверны. Это подтверждается сопоставлением полученных результатов с данными, представленными в литературе, а также корректной постановкой экспериментов и согласованностью разработанных моделей с экспериментальными данными. Представленные в работе результаты имеют как научную, так и практическую ценность. Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 13 работах, в том числе 4 статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ, 9 работ в трудах конференций и 1 свидетельстве о регистрации патента. Полученные результаты неоднократно докладывались на международных и всероссийских научных конференциях. Автореферат диссертации правильно и полно отражает её содержание, включая основные результаты, защищаемые положения, актуальность работы, научную новизну и значимость, цель работы, достоверность и вклад автора.

На основании вышеизложенного считаю, что диссертационная работа Смолякова Д.А. «Магнитотранспортные свойства гибридных структур $\text{Fe/SiO}_2/\text{p-Si}$ и $\text{Mn/SiO}_2/\text{n-Si}$ », в полной мере отвечает требованиям п.9-14 «Положения о порядке

присуждения ученых степеней», предъявляемых ВАК к работам, представленным на соискание ученой степени кандидата наук (Постановление Правительства РФ № 842 от 24.09.13 с изменениями от 21.04.2016 г. №335), а ее автор, Смоляков Дмитрий Александрович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений

Официальный оппонент

И.о заведующего лабораторией физики
неоднородных систем ОФТТ ФИАН,
гл.н.с., д.ф.-м.н.

/Ф.А. Пудонин/

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт им. П.Н.Лебедева Российской академии наук,
119991, Москва, ГСП-1, Ленинский проспект, д.53,
Тел.: +7(499) 132-67-57, **E-mail:** pudonin@sci.lebedev.ru
Подпись Ф.А. Пудонина удостоверяю:

Ученый секретарь
Физического института им. П.Н.Лебедева РАН
к.ф.-м.н.



/А.В. Колобов /

СВЕДЕНИЯ **об официальном оппоненте**

по диссертации Смолякова Дмитрия Александровича “Магнитотранспортные свойства гибридных структур Fe/SiO₂/p-Si и Mn/SiO₂/n-Si”, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений

Фамилия, имя, отчество оппонента	Пудонин Фёдор Алексеевич
Ученая степень	доктор физ.-мат. наук
Ученое звание	
Шифр и наименование специальности	01.04.07 – физика конденсированного состояния
Полное наименование организации	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук
Структурное подразделение и должность	И.о. зав. лабораторией Физики неоднородных систем ФИАН, главный научный сотрудник
Адрес организации	19991, г. Москва, Ленинский проспект 53
Телефон	+7(499)132-6757
Адрес электронной почты	pudonin@sci.lebedev.ru
Список основных публикаций работников структурного подразделения, составляющего отзыв за последние 5 лет (не более 15 публикаций)	<p>1. A. P. Boltaev, F. A. Pudonin, I. A. Sherstnev, D.A. Egorov, A.M. Kozmin «Flat magnetic exchange springs as mechanism for additional magnetoresistance in magnetic nanoisland arrays», JMMM, 428, p. 132–135, (2017)</p> <p>2. Zavaritskaya, T.N., Melnik, N.N., Pudonin, F.A., Talarico, O.S., Sherstnev, I.A. « Synthesis of carbon planar structures with specified properties», Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 81(3), pp. 301-304 (2017)</p> <p>3. A. Stupakov, A. V. Bagdinov, V. V. Prokhorov, A. N. Bagdinova, E. I. Demikhov, A. Dejneka, K. I. Kugel, A. A. Gorbatsevich, F. A. Pudonin, and N. N. Kovaleva «Out-of-plane and in-plane magnetization behavior of dipolar interacting FeNi nanoislands around the percolation threshold», Journal of Nanomaterials, Volume 2016, Article ID 3190260, 9 pages</p> <p>4. Т. Н. Заварицкая, Н. Н. Мельник, Ф. А. Пудонин, И. А. Шерстнев «Много-слойная графеновая структура углерода в короткопериодных сверхрешетках», Письма в ЖЭТФ, т. 103, в.5, с. 385–388, (2016)</p> <p>5. А.П.Болтаев, Ф.А.Пудонин, И.А.Шерстнев, «Низкочастотная гигантская эффективная диэлектрическая проницаемость островковых металлических пленок», ФТТ, т. 57, в. 10, с. 2043-2049, (2015)</p> <p>6. N. N. Kovaleva, D. Chvostova, A. V.</p>

Bagdinov, M. G. Petrova, E. I. Demikhov, F. A. Pudonin, and A. Dejneka «Interplay of electron correlations and localization in disordered β -tantalum films: Evidence from dc transport and spectroscopic ellipsometry study», Appl. Phys. Lett., **106**, 051907 (2015)

7. Alekseev A.; Popkov A.; Shubin A.; Pudonin F., Djuzhev, N., “Effect of horizontal magnetization reversal of the tips on magnetic force microscopy images”, ULTRAMICROSCOPY V. 136, P. 91-95 (2014)

8. A.P.Boltaev, F.A. Pudonin, I.A.Sherstnev, «Conductance of island and granular metal films», Solid State Communications, 180, 39–43, (2014)

9. Igor E. Protsenko, A. P. Boltaev, F. A. Pudonin, A. V. Uskov, I. A. Sherstnev “Non-Contact Detection of Nonlinear Conductance in Island Metal Films” Journal of Russian Laser Research , 34(6):537, (2013)

10. A.P.Boltaev, F.A. Pudonin, I.A.Sherstnev, “Vortex-like magnetization of multilayer magnetic nanoisland systems in weak magnetic fields”, Appl. Phys. Lett., 102, 142404 (2013)

Официальный оппонент

И.о. зав. лаб., гл.н.с.
д.ф.-м.н.



/Пудонин Ф.А./

«__»_____2017г.

Подпись Ф.А. Пудонина удостоверяю:

Ученый секретарь

Физического института им. П.Н.Лебедева РАН

к.ф.-м.н.



/А.В. Колобов_/