

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Смолякова Дмитрия Александровича “**Магнитотранспортные свойства гибридных структур Fe/SiO<sub>2</sub>/p-Si и Mn/SiO<sub>2</sub>/n-Si**”, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений

**Актуальность темы диссертации.** При изучении магнитотранспортных явлений в массивных и пленочных материалах наибольший интерес исследователей вызывают эффекты с большими изменениями функциональных характеристик, управляемых магнитным полем, током, температурой и другими факторами. Это обусловлено возможностью использования такого рода материалов в широком спектре практических приложений. Большое внимание в последние десятилетия уделялось и уделяется в настоящее время синтезу и исследованию многослойных наноструктур с эффектами гигантского и туннельного магнитосопротивления, материалов с колоссальным магнитосопротивлением и гигантским магнитным импедансом. Диссертационная работа Смолякова Д.А. посвящена исследованию явлений магнитоиндуцированного электронного транспорта в гибридных пленочных структурах на основе кремния и слоев ферромагнитных металлов Fe и Mn. В ней анализируются вопросы, также связанные с проявлением гигантских аномалий в транспортных свойствах исследуемых материалов, что подчеркивает **актуальность данной работы.**

**Структура и основное содержание диссертации.** Диссертация состоит из введения, обзора, 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 опубликованных работ по тематике диссертации. Рассмотрены особенности магнитного импеданса в различных материалах. Описаны различные созданные устройства магнитоэлектроники, функционирующие на основе данного эффекта, отмечены их достоинства и недостатки. Во второй главе представлено описание технологии приготовления гибридных МДП структур, использованной для получения пленочных образцов Fe/SiO<sub>2</sub>/n-Si и Mn/SiO<sub>2</sub>/p-Si. Приведены данные о характеризации полученных образцов методами электронной микроскопии, описана экспериментальная установка, использованная для исследований транспортных и магнитотранспортных свойств на переменном токе. В третьей главе описаны результаты исследования

25.05.2017 г

356-03/6215-141

гигантского магнитного импеданса (ГМИ) гибридной МДП структуры  $\text{Fe/SiO}_2/\text{n-Si}$ , полученные при низких температурах. Приведены зависимости реальной и мнимой частей импеданса от температуры, напряженности магнитного поля и напряжения смещения. Предложена интерпретация полученных результатов. В четвертой главе приведены результаты исследования ГМИ для структуры  $\text{Mn/SiO}_2/\text{p-Si}$ . Показаны отличия в магнитотранспортных свойствах МДП структур с различным типом легирования кремния. Приведены результаты исследования импеданса и вольт-амперных характеристик простейшего устройства, изготовленного на основе гибридной структуры с эффектом ГМИ. В заключении сделаны основные выводы по диссертации.

Среди полученных научных результатов, отражающих **научную значимость работы**, следует выделить следующие.

1) Для двух типов гибридных МДП структур  $\text{Fe/SiO}_2/\text{n-Si}$  и  $\text{Mn/SiO}_2/\text{p-Si}$  получены экспериментальные данные об особенностях проявления и изменения гигантского магнитного импеданса в зависимости от температуры, частоты, напряженности магнитного поля и поля смещения. Для структуры  $\text{Fe/SiO}_2/\text{n-Si}$  при фиксированной напряженности магнитного поля  $H = 10$  кЭ получено максимальное значение магнитосопротивления  $MR = 400$  %, рассчитанное для реальной части импеданса, а для структуры  $\text{Mn/SiO}_2/\text{p-Si}$  –  $MR = 200\%$ .

2) Для структуры  $\text{Mn/SiO}_2/\text{p-Si}$  выявлена возможность значительного увеличения магнитосопротивления при превышении напряжения смещения выше порогового, что при низких температурах позволяет получать значения магнитосопротивления до  $10^7$  %, а в случае постоянного тока – до  $10^8$  %. Показано, что выбором напряжения смещения можно изменять также и форму полевой зависимости  $MR(H)$ , что позволяет управлять чувствительностью к магнитному полю.

3) В работе предложена интерпретация для основных обнаруженных закономерностей изменения импеданса в исследованных структурах, вызванных магнитным полем или напряжением смещения. Проанализированы вклады в результирующее сопротивление МДП структуры и получено выражение, определяющее зависимость напряжения смещения от величины тока, хорошо описывающее соответствующую экспериментальную вольт-амперную характеристику.

4) Изготовлено и запатентовано устройство на основе МДП структуры  $\text{Fe/SiO}_2/\text{n-Si}$ , функционирующее на основе эффекта гигантского магнитного импеданса.

**Достоверность** полученных и представленных автором результатов исследований подтверждается отработанными методиками изготовления образцов, использованием поверенных приборов в составе используемых экспериментальных установок.

**Обоснованность выводов** базируется на всестороннем экспериментальном изучении свойств синтезированных гибридных МДП структур и предложенной теоретической интерпретации наблюдаемых закономерностей, позволившей качественно и количественно объяснить основные полученные экспериментальные данные.

**Практическая значимость полученных результатов** обусловлена обнаруженными гигантскими изменениями магнитного импеданса в гибридных МДП структурах при низких температурах, управляемых частотой и напряжением смещения, что может быть использовано для разработки на их основе новых изделий микроэлектроники с высокой чувствительностью функциональных характеристик к магнитному полю. Возможность создания таких изделий продемонстрирована на примере разработанного и запатентованного МДП диода с барьером Шоттки, обладающего эффектом гигантского магнитного импеданса.

#### **Замечания по диссертационной работе.**

1) Несмотря на хорошо подготовленные иллюстрации и достаточно подробное описание в работе полученных результатов, следует указать на недостатки в стиле изложения материала, опечатки в тексте и отметить слишком вольное использование различных терминов и неудачных выражений, что затрудняет понимание текста диссертации. В качестве примера можно привести следующие выражения: «экспериментальная геометрия» (стр. 40), «трудная коэрцитивная ось должна иметь значения в доли эрстед» (стр. 17), «напряжение сжатия ... стремится выстроить магнитные моменты в окружном направлении в пользу минимальной энергии системы» (стр. 23), «направление тяжелой оси образца» (стр. 26), «структура состоит из проводящего слоя, зажатой между двумя мягкими ферромагнитными слоями» (стр. 28), «процессы туннелирования между металлом и поверхностными состояниями» (стр. 66), «уровни энергии акцепторных центров закреплены ... на границе  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ » (стр. 77), «система имеет параболическую зонную дисперсию» (стр. 94).

2) На стр. 78 отмечено, что коэффициент термической рекомбинации  $B_T$  определяется из условия  $1/T_p = 0$ . Хотя далее в тексте дано словесное объяснение процедуры определения величины коэффициента, но запись самого условия является некорректной.

3) На фотографии поперечного среза структуры  $\text{Fe}/\text{SiO}_2/\text{n-Si}$  (стр. 42, рис. 12) не указаны типы материалов и толщины отдельных слоев, что затрудняет понимание последующего текста, касающегося данного рисунка.

Указанные замечания относятся, главным образом, к стилю изложения материала и не касаются качества полученных экспериментальных результатов и сути их интерпретации, поэтому не снижают высокий научный уровень представленной работы.

Следует отметить, что диссертационная работа хорошо структурирована, её части логически связаны между собой, а полученные в диссертации результаты соответствуют поставленной в работе цели и задачам. Содержание автореферата достаточно полно отражает содержание и результаты работы.

В целом диссертация производит хорошее впечатление и **представляет собой законченную работу**. Содержание диссертации **соответствует паспорту специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений**. По теме диссертационной работы Смолякова Д.А. в соавторстве опубликовано **4** статьи в зарубежных журналах, входящих в **Перечень ВАК** и индексируемых в системе **Web of Science**, и получен 1 патент. Работа хорошо **апробирована**, её результаты докладывались на многочисленных российских и международных конференциях и симпозиумах.

Считаю, что диссертационная работа Смолякова Дмитрия Александровича **“Магнитотранспортные свойства гибридных структур Fe/SiO<sub>2</sub>/p-Si и Mn/SiO<sub>2</sub>/n-Si”** удовлетворяет требованиям п. 9 Положения «О порядке присуждения ученых степеней» ВАК Министерства образования и науки РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Смоляков Д.А. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – Физика магнитных явлений.

Официальный оппонент:

ведущий научный сотрудник лаборатории электрических явлений Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук (ФГБУН ИФМ УрО РАН), кандидат физико-математических наук

« 18 » мая 2017 г.



Миляев Михаил Анатольевич

Почтовый адрес: 620990, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18  
Тел.: (343)378-38-81

Е-mail: 

И.о. ученого секретаря ИФМ УрО РАН,  
кандидат физ.-мат. наук



 И.Ю. Арапова

**СВЕДЕНИЯ**  
**об официальном оппоненте**

по диссертации Смолякова Дмитрия Александровича “**Магнитотранспортные свойства гибридных структур Fe/SiO<sub>2</sub>/p-Si и Mn/SiO<sub>2</sub>/n-Si**”, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений

Фамилия, имя, отчество оппонента	Миляев Михаил Анатольевич
Ученая степень	кандидат физ.-мат. наук
Ученое звание	
Шифр и наименование специальности	01.04.11 – физика магнитных явлений
Полное наименование организации	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук
Структурное подразделение и должность	лаборатория электрических явлений, ведущий научный сотрудник
Адрес организации	620990, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18
Телефон	(343) 378-38-81
Адрес электронной почты, сайт	<a href="mailto:mi@imp.uran.ru">mi@imp.uran.ru</a> ; <a href="http://www.imp.uran.ru">http://www.imp.uran.ru</a>
Основные публикации по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15 публикаций)	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. M. Milyaev, L. Naumova, T. Chernyshova, V. Proglyado, I. Kamensky, T. Krinitsina, M. Ryabukhina, V. Ustinov. Magnetization reversal and inverted magnetoresistance of exchange-biased spin valves with a gadolinium layer // Journal of Applied Physics, 2017, V. 121, P. 123902 (1–5).</li> <li>2. M. Milyaev, L. Naumova, T. Chernyshova, V. Proglyado, I. Kamensky, and V. Ustinov. Spin-flop in synthetic antiferromagnet and anhysteretic magnetic reversal in FeMn-based spin valves // IEEE Trans. Magn., 2016, V. 52, № 12, P. 2301104 (1–4).</li> <li>3. Н.С. Банникова, М.А. Миляев, Л.И. Наумова, Т.П. Криницина, Е.И. Патраков, В.В. Проглядо, Т.А. Чернышова, В.В. Устинов. Сверхрешетки NiFeCo/Cu с высокой магниторезистивной чувствительностью и слабым гистерезисом // ФТТ, 2016, Т. 58,</li> </ol>	

№ 10, С. 1940–1946.

4. М.А. Миляев, Л.И. Наумова, Т.А. Чернышова, В.В. Проглядо, Н.А. Кулеш, Е.И. Патраков, И.Ю. Каменский, В.В. Устинов. Спин-флоп состояния в синтетическом антиферромагнетике и изменения однонаправленной анизотропии в спиновых клапанах на основе FeMn // ФММ, 2016, Т. 217, № 12, С. 1227–1233.
5. I.D. Lobov, M.M. Kirillova, A.A. Makhnev, M.A. Milyaev, L.N. Romashev, V.V. Ustinov. Spin-dependent scattering of conduction electrons in Co/Cu multilayers // JMMM, 2015, No 389, P. 169–175.
6. М.А. Миляев, Л.И. Наумова, Н.С. Банникова, В.В. Проглядо, И.К. Максимова, И.Ю. Каменский, В.В. Устинов. Uniaxial anisotropy variations and the reduction of free layer coercivity in MnIr-based // Applied Physics A, 2015, V. 121, No. 3, P. 1133–1137.
7. М.А. Миляев, Л.И. Наумова, В.В. Проглядо, Т.А. Чернышова, Д.В. Благодатков, И.Ю. Каменский, В.В. Устинов. Температурная стабильность спиновых клапанов на основе синтетического антиферромагнетика и сплава Fe<sub>50</sub>Mn<sub>50</sub> // ФММ, 2015, Т. 116, № 11, С. 1129–1135.
8. Н.С. Банникова, М.А. Миляев, Л.И. Наумова, В.В. Проглядо, Т.П. Криницина, И.Ю. Каменский, В.В. Устинов. Гигантское магнитосопротивление сверхрешеток CoFe/Cu с буферным слоем (Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>)<sub>60</sub>Cr<sub>40</sub> // ФММ, 2015, Т. 116, № 10, С. 1040–1046.
9. Н.С. Банникова, М.А. Миляев, Л.И. Наумова, В.В. Проглядо, Т.П. Криницина, Т.А. Чернышова, В.В. Устинов. Влияние отжига на магнитосопротивление и микроструктуру многослойных систем CoFe/Cu с различным буферным слоем // ФММ, 2015, Т. 116, № 2, С. 165–170.
10. М.А. Миляев, Л.И. Наумова, И.Ю. Каменский, В.В. Устинов. Спиновые клапаны на основе Mn<sub>75</sub>Ir<sub>25</sub> с управляемыми функциональными параметрами // Известия вузов. ЭЛЕКТРОНИКА, 2014, Т. 108, № 4, С. 15–20.
11. V.V. Ustinov, M.A. Milyaev, L.I. Naumova. Interlayer coupling and magnetic anisotropy as key factors for creation of hysteresis-less spin valves // SPIN, 2014, V. 4, № 1, P. 1440001 (1–9).
12. Л.И. Наумова, М.А. Миляев, Н.Г. Бебенин, Т.А. Чернышова, В.В. Проглядо, Т.П. Криницина, Н.С., Банникова, В.В. Устинов. Безгистерезисное перемангничивание спиновых клапанов с сильным и слабым межслойным взаимодействием // ФММ, 2014, Т. 115, № 4, С. 376–383.
13. V.V. Ustinov, M.A. Milyaev, L.I. Naumova, T.P. Krinitsina, V.V. Proglyado and E.I. Patrakov. Top Non-collinear Spin Valves with a Composite Free Layer for Hysteresis-free GMR Sensors // Journal of the Korean Physical Society, 2013, V. 63, No. 3, P. 663–666.
14. М.А. Миляев, Л.И. Наумова, В.В. Проглядо, Т.П. Криницина, Н.С. Банникова, А.М. Бурханов, В.В. Устинов. Степень совершенства текстуры <111> и гистерезис магнитосопротивления в спиновых клапанах на основе MnIr // ФММ, 2013, Т. 114, № 5, С. 419–426.
15. Н.А. Виглин, В.В. Марченков, М.А. Миляев, С.В. Наумов, Е.И. Патраков, А.О. Шориков, Е.И. Шредер, К.А. Белозерова. Структура, магнитные, электрические и оптические свойства тонких пленок сплавов Гейслера Fe<sub>2</sub>NbSn и Co<sub>2</sub>Cr<sub>0.6</sub>Fe<sub>0.4</sub>Al, полученных методом магнетронного распыления // ФММ, 2013, Т. 114, № 12, С. 1086–1091.

И.о. ученого секретаря ИФМ УрО РАН,  
кандидат физ.-мат. наук



И.Ю. Арапова