

«Утверждаю»

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Физико-
технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской
академии наук



2017 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Смолякова Дмитрия Александровича
“Магнитотранспортные свойства гибридных структур Fe/SiO₂/p-Si и Mn/SiO₂/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 магнитоэлектронного транспорта в гибридных структурах на основе кремния Fe/SiO₂/n-Si, Mn/SiO₂/p-Si. Большая часть работы основана на исследованиях транспортных свойств на переменном токе при воздействии напряжения смещения и внешнего магнитного поля.

Актуальность темы выполненной работы связана с неослабевающим интересом к магнитоэлектронике и спинтронике и, в частности, к гибридным системам ферромагнетик/полупроводник, исследованию возможностей их практического применения. Считается, что такие системы смогут, в будущем, использоваться в практических устройствах в качестве ячеек как для обработки, так и для хранения информации. Исследования показывают, что граница раздела в структурах ферромагнетик/полупроводник играет доминирующую роль в приборах полупроводниковой спинтроники. Явления, происходящие на гетерограницах, до конца не поняты, поэтому исследование условий получения этих структур, изучение их физических свойств является актуальной задачей.

Научная новизна работы заключается в обнаружении новых эффектов, впервые исследован магнитоимпеданс в структурах ферромагнетик/полупроводник Fe/SiO₂/n-Si, Mn/SiO₂/p-Si. Получены рекордные значения магнитоимпеданса и показано, что подобные структуры могут быть использованы в высокочастотных приборах. Неожиданным оказалось гигантский эффект смещения на магнитоимпеданс структуры Mn/SiO₂/p-Si – этот практически важный результат означает, что магнитоимпедансом можно эффективно управлять, что может найти применение в различных функциональных устройствах. Показателем новизны является и то, что на основе проделанных исследований, было разработано и запатентовано практическое устройство, основанное на эффекте магнитоимпеданса.

Значимость результатов для науки и производства определяется их фундаментальностью и потенциалом практического применения. В результате проделанных исследований, были получены данные о перезарядке поверхностных центров на интерфейсах структур Fe/SiO₂/n-Si, Mn/SiO₂/p-Si, о магнитоимпедансе,

25.05.2017 г.

356-03/6215-142

возникающем за счет участия поверхностных центров и влиянии смещения на эту характеристику. Эти эффекты могут быть основой при разработке устройств, чувствительных к магнитному полю, а также при изготовлении высокочастотных приборов.

Рекомендации по использованию результатов и выводов. Полученные в диссертационной работе новые знания представляют несомненный интерес для специалистов, занимающихся проблемами создания устройств твердотельной электроники, использующих спиновую поляризацию носителей заряда для хранения, записи или считывания информации. С полученными результатами целесообразно ознакомить следующие организации: Институт физики твердого тела (г. Черноголовка), Институт физики металлов (г. Екатеринбург), Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова (г. Новосибирск), Физический институт им. П.Н.Лебедева (г. Москва), Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт" (г. Москва), Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (г. Москва), Новосибирский государственный университет (г. Новосибирск), Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского (г. Нижний Новгород), Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского (г. Казань), Казанский федеральный университет (г. Казань), Санкт-Петербургский государственный университет (г. Санкт-Петербург).

Диссертация 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 также перспективы развития подобных устройств в дальнейшем.

Во *второй главе* представлено описание технологии получения гибридных структур на основе кремния. Изготовлены структуры $Fe/SiO_2/n-Si$ и $Mn/SiO_2/p-Si$ 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 $Fe/SiO_2/n-Si$. Обнаружены особенности, возникающие ниже 40К на температурной зависимости в виде пика реальной $R(T)$ и ступени 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 ступень $X(T)$ меняет свою высоту. Эти эффекты объяснены наличием поверхностных центров на границе диэлектрик-полупроводник $SiO_2/n-Si$ и процессами их перезарядки, идущими посредством прямого процесса испускания-захвата электронов с участием зоны проводимости. Влияние внешнего магнитного поля, которое проявляется как сдвиг особенностей в область более высоких температур, сводится к сдвигу 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 $V_b = -5$ В, так же происходит сдвиг особенностей на температурных зависимостях, для $V_b = 5$ В изменений не наблюдалось. Этот 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 Mn/SiO₂/p-Si. Как и для случая структуры Fe/SiO₂/n-Si обнаружены особенности, возникающие ниже 40К, зависящие от частоты переменного сигнала, магнитного поля и смещения. При V_b= 5 V, происходит сдвиг особенностей на температурных зависимостях, однако для обратного смещения V_b= -5 V изменений нет. Данные эффекты объяснены в рамках ранее предложенной модели. Эта модель подтверждается, например, влиянием смещения на изгиб зон полупроводника на границе диэлектрик/полупроводник: для полупроводника n-типа обратное напряжение смещения V_b вызывало сдвиг температурной особенности R_{ac}(T), а прямое смещение такого влияния не имело. Для структуры с полупроводником p-типа все происходит диаметрально противоположно. При достижении напряжения смещения порогового значения, особенности на температурной зависимости подавляются, но при воздействии внешнего магнитного поля снова восстанавливают свою форму. Благодаря этому наблюдается эффект гигантского магнитоимпеданса.

Исследованы транспортные свойства МДП диода с барьером Шоттки на постоянном токе. Для области температур 40–300 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. Возникает резкий скачок при достижении порогового напряжения, равного 2В. Магнитное поле сдвигает пороговое напряжение, при котором возникает особенность на вольт-амперных характеристиках. Эта особенность связывается 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 SiO₂. Кроме того вклад слоя диэлектрика SiO₂ 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. Результат вычислений оказался достаточно точным и хорошо согласуется экспериментальными кривыми.

Обнаружено магнитосопротивление на переменном токе для структуры Mn/SiO₂/p-Si достигающее значений 10⁶ %, на постоянном токе до 10⁸ %. На основе проделанных исследований, был разработан и запатентован магниточувствительный элемент. Действие прибора основано на эффекте изменения магнитоимпеданса в магнитном поле.

По диссертационной работе и докладу соискателя можно сделать некоторые замечания и рекомендации по направлениям дальнейших исследований.

1. В работе диссертанта используется измеритель частотных характеристик типа AGILENT. Устройства такого рода, как правило, могут не только выделять реальную компоненту импеданса сложных систем, но и другие характеристики: фазовый угол, мнимую составляющую импеданса, его модуль. Из этих измерений можно было бы извлечь больше информации, Это может оказаться полезным для дальнейших исследований, поскольку вид годографа импеданса как функции частоты (часто называемый графиком Коула-Коула) обычно более чувствителен к любым явлениям в объекте, чем отдельные числа и даже зависимости. Также совмещение зависимостей мнимых и действительных компонент как функций частоты помогает идентифицировать природу аномалий, например, выявить наличие Максвелл-Вагнеровской релаксации.

2. В работе исследуются и сравниваются две структуры: Fe/SiO₂/p-Si и Mn/SiO₂/n-Si – с разными магнитными слоями и с разным типом полупроводника. С нашей точки зрения, сравнение структур с Fe и Mn было бы целесообразно дополнить экспериментами для одного и того же типа полупроводника.

3. Диссертант наблюдал очень интересный эффект: резкий скачок в вольт-амперной характеристике ниже 40 К при достижении порогового напряжения, равного 2В. Эта особенность обоснованно связывается с возникновением ударной ионизации в слое полупроводника. Поскольку развитие ударной ионизации определяется приповерхностным электрическим полем на границе раздела (шириной области пространственного заряда), следовало бы исследовать этот эффект в зависимости от концентрации примеси и поверхностных состояний, а также от подсветки.

4. Насколько можно судить, роль ферромагнетика осталась невыясненной в наблюдаемых в работе явлениях. Было бы полезно расширить класс структур, а именно исследовать разные ФМ, чтобы выяснить роль ферромагнетика.

Все перечисленные выше замечания носят непринципиальный, преимущественно рекомендательный характер, не затрагивают основных выводов диссертации и не влияют на качество полученных результатов.

Заключение по диссертационной работе.

Диссертация Смолякова Д.А. представляет законченную научно-исследовательскую работу, которая по актуальности поставленных задач, научной новизне, теоретической и практической значимости, достоверности полученных результатов, степени обоснованности выводов и рекомендаций, объёму выполненных исследований, уровню работ, опубликованных в открытой печати, полностью соответствует квалификационным требованиям п.9 «Положения о присуждении учёных степеней» утверждённого постановлением Правительства РФ №842 от 24 сентября 2013 г., предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, а её автор – Смоляков Дмитрий Александрович – заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений.

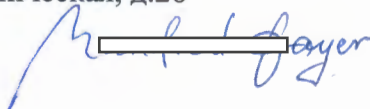
Содержание диссертационной работы докладывалось и обсуждалось на объединённом семинаре лаборатории оптики полупроводников и лаборатории СпинОптроники Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН 25 апреля 2017 г.

Заведующий лабораторией оптики полупроводников
Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН 194021,
г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.26
доктор физ.-мат. наук,
профессор



Кусраев Юрий Георгиевич

Заведующий лабораторией СпинОптроники
Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН 194021,
г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.26
профессор



Манфред Байер

Сведения о ведущей организации

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

Полное наименование организации	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук»
Сокращённое наименование организации	ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН
Адрес организации	194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26.
Телефон	+7(812) 297-55-46
Сайт	http://www.ioffe.ru/
Электронная почта	post@mail.ioffe.ru
Список основных публикаций работников структурного подразделения, составляющего отзыв за последние 5 лет (не более 15 публикаций)	<ol style="list-style-type: none"> 1. M. Kotur, R. I. Dzhioev, K. V. Kavokin, V. L. Korenev, B. R. Namofov, P. E. Pak, Yu. G. Kusrayev. Nuclear spin relaxation mediated by Fermi-edge electrons in n-type GaAs. <i>Pis'ma v ZhETF</i>, vol. 99, iss. 1, pp. 40 – 44 (2014) 2. A. S. Gurin, D. O. Tolmachev, N. G. Romanov, B. R. Namofov, P. G. Baranov, Yu. G. Kusrayev, G. Karczewski, <i>ODMR evidence of electronic cascade in multiple asymmetrical (CdMn)Te quantum wells</i>. <i>Pis'ma v ZhETF</i>, vol. 102, iss. 4, pp. 257 – 261 (2015) 3. Feng Liu, A. V. Rodina, D. R. Yakovlev, A. Greilich, A. A. Golovatenko, A. S. Susha, A. L. Rogach, Yu. G. Kusrayev, and M. Bayer. Exciton spin dynamics of colloidal CdTe nanocrystals in magnetic fields, <i>Phys. Rev. B</i> 89, 115306 (2014) 4. Feng Liu, A. V. Rodina, D. R. Yakovlev, A. A. Golovatenko, A. Greilich, E. D. Vakhtin, A. Susha, A. L. Rogach, Yu. G. Kusrayev, and M. Bayer, <i>Förster energy transfer of dark excitons enhanced by a magnetic field in an ensemble of CdTe colloidal nanocrystals</i>, <i>Phys. Rev. B</i> 92, 125403 (2015) 5. K. A. Baryshnikov, L. Langer, I. A. Akimov, V. L. Korenev, Yu. G. Kusrayev, N. S. Averkiev, D. R. Yakovlev, and M. Bayer. <i>Resonant optical alignment and orientation of Mn²⁺ spins in CdMnTe crystals</i>, <i>Phys. Rev. B</i> 92, 205202 (2015) 6. V. L. Korenev, M. Salewski, I. A. Akimov, V. F. Sapega, L. Langer, I. V. Kalitukha, J. Debus, R. I. Dzhioev, D. R. Yakovlev, D. Müller, C. Schröder, H. Hövel, G. Karczewski, M. Wiaterski, T. Wojtowicz, Yu. G. Kusrayev & M. Bayer. <i>Long-range p-d exchange interaction in a ferromagnet-semiconductor hybrid structure</i>. <i>Nature Physics</i> (2015) doi:10.1038/nphys3497. 7. A. V. Koudinov, R. I. Dzhioev, V. L. Korenev, V. F. Sapega, Yu. G. Kusrayev, <i>Optical spin orientation of minority holes in a modulation-doped GaAs/(Ga,Al)As quantum well</i>. <i>Phys. Rev. B</i>, 93,

- 165301 (2016)
8. P. G. Baranov, N. G. Romanov, D. O. Tolmachev, A. S. Gurin, B. R. Namozov, Yu. G. Kusrayev, G. Karczewski, S. Orlinskii, C. De Mello Donega, J. Schmidt, Evidence of exchange interaction of localized carriers and transition metals in diluted II-VI nanostructures: ODMR study. *Phys. Status Solidi C*, 1–4 (2016) / DOI 10.1002/pssc.201510249
9. E. A. Zhukov, Yu. G. Kusrayev, K. V. Kavokin, D. R. Yakovlev, J. Debus, A. Schwan, I. A. Akimov, G. Karczewski, T. Wojtowicz, J. Kossut, and M. Bayer. Optical orientation of hole magnetic polarons in (Cd,Mn)Te/(Cd,Mn,Mg)Te quantum wells. *Phys. Rev. B* **93**, 245305 (2016)
10. Yu G. Kusrayev. *Spin-Dependent Phenomena in Semiconductors and Semiconductor/Ferromagnetic Heterostructures*, Applied Magnetic Resonance, July 2016, Volume 47, Issue 7, pp 657–669. DOI: 10.1007/s00723-016-0790-8
11. H. Kraus, V. A. Soltamov, D. Riedel, S. Vāth, F. Fuchs, A. Sperlich, P. G. Baranov, V. Dyakonov, G. V. Astakhov, Room-temperature quantum microwave emitters based on spin defects in silicon carbide, *Nature Physics* **10**, 157–162 (2014)
12. M. Otsuka, T. Matsuoka, L. S. Vlasenko, M. P. Vlasenko, and K. M. Itoh, Identification of photo-induced spin-triplet recombination centers situated at Si surfaces and Si/SiO₂ interfaces, *Appl. Phys. Lett.* **103**, 111601 (2013).
13. A. M. Mintairov, J. Kapaldo, J. L. Merz, A. S. Vlasov and S. A. Blundell, Wigner molecules and charged excitons in near-field magneto-photoluminescence spectra of self-organized InP/GaInP quantum dots, *Phys. Rev. B* **95**, 115442 (2017).

Ученый секретарь



Шерин А. П.