

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.228.02, СОЗДАННОГО
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
НАУЧНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ «ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ЦЕНТР «КРАСНОЯРСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК» ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 17.12.2021 г. № 9

О присуждении Лукьяненко Анне Витальевне, гражданке Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Создание и исследование многотерминальных устройств на основе гибридных структур ферромагнетик/Si» по специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики принята к защите 08.10.2021 г. (протокол заседания № 5) диссертационным советом 24.1.228.02, созданным на базе Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН), 660036, Красноярск, Академгородок, д. 50, приказ Минобрнауки № 1514/НК от 25.11.2016 г.

Соискатель Лукьяненко Анна Витальевна, «10» июля 1991 года рождения, в 2018 году окончила Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет», выдавшее диплом об окончании аспирантуры.

Работает младшим научным сотрудником в лаборатории радиоспектроскопии и спиновой электроники Института физики им. Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленном подразделении ФИЦ КНЦ СО РАН (ИФ СО РАН).

Диссертация выполнена в лаборатории радиоспектроскопии и спиновой электроники Института физики им. Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН.

Научный руководитель – *Волков Никита Валентинович*, доктор физико-математических наук, профессор, Генеральный директор Акционерного общества «Красноярский электровагоноремонтный завод», главный научный сотрудник лаборатории радиоспектроскопии и спиновой электроники ИФ СО РАН.

Официальные оппоненты: *Терещенко Олег Евгеньевич*, доктор физико-математических наук, профессор, с.н.с., и.о. зав. лаб. физики и технологии гетероструктур, Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН; *Логинов Юрий Юрьевич*, доктор физико-математических наук, профессор, проректор по научной и инновационной деятельности, Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева» – дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Владивосток, в своем положительном отзыве, подписанном кандидатом физико-математических наук, старшим научным сотрудником лаборатории гибридных структур (№ 102) Балашевым Вячеславом Владимировичем, указала, что реализация спиновой функциональности в кремнии, который является базовым полупроводником в современной электронике, является важной целью, а также что все основные результаты работы являются новыми.

Соискатель имеет 32 опубликованные работы, в том числе 6 работ по теме диссертации опубликовано в рецензируемых научных изданиях. Сведения об опубликованных соискателем работах, вида, авторского вклада и объёма научных изданий, указанные в диссертационной работе, являются достоверными. Наиболее значимые работы: 1) Tarasov A. S., Lukyanenko A. V., Tarasov I. A.,

Bondarev et al. Approach to form planar structures based on epitaxial $\text{Fe}_{1-x}\text{Si}_x$ films grown on Si (111) //Thin Solid Films. – 2017. – Т. 642. – С. 20–24. 2) Tarasov A. S., Lukyanenko A. V., Bondarev I. A., Rautskii et al. Fabrication and DC/AC Characterization of 3-Terminal Ferromagnet/Silicon Spintronics Devices //Semiconductors. – 2018. – Т. 52. – №. 14. – С. 1875–1878. 3) Tarasov A. S., Lukyanenko A. V., Rautskii M. V., et al. Spin-dependent electrical hole extraction from low doped p-Si via the interface states in a $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{p-Si}$ structure //Semiconductor Science and Technology. – 2019. – Т. 34. – №. 3. – С. 035024.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы (все положительные):

Ведущая организация (ИАПУДВО РАН). Отзыв положительный. Отмечено, что цель работы является актуальной. Все задачи, поставленные в диссертационной работе, успешно решены. Работа является законченным исследованием, выполненным на высоком научном и техническом уровне, вносящим весомый вклад в развитие новых технологических подходов для изготовления субмикронных устройств на базе гибридных структур ферромагнетик/кремний и реализации спин-зависимого электронного транспорта. Замечания: 1) Чем вызван интерес автора к исследованиям на образцах кремния с (111)-ориентацией, в то время как в современном полупроводниковом производстве распространённой является (001)-ориентация? 2) В главе 2.5 на стр. 74 диссертации сказано, что кристалличность выращенных слоёв исследована спектроскопией резерфордовского обратного рассеяния (РОР), а химический состав подтвердился этим же методом и рентгеноструктурным анализом (РСА). Насколько оправдана такая формулировка автором? Так, РСА является методом, который изучает кристаллическую структуру, а метод РОР определяет элементный состав. 3) Публикации по ссылкам [111] и [115] не соответствуют содержанию текста предложений, который на них ссылается. 4) В научной новизне своей работы, автор сообщает об изготовлении 4-х контактного устройства и обнаружении эффекта спиновой аккумуляции. Однако, данный эффект в работе наблюдается, используя трёх-контактную схему подключения (Глава 4.2). 5) К сожалению, автором работы было проведено исследование эффекта спиновой аккумуляции

только для одной плёнки – $\text{Fe}_{0,75}\text{Si}_{0,25}$, а для плёнок с другим составом $\text{Fe}:\text{Si}$, в том числе и просто плёнки Fe , не было.

Д.ф-м.н., профессор Терещенко Олег Евгеньевич, с.н.с., и.о. зав. лаб. – официальный оппонент. Отзыв положительный. Отмечено, что автором выполнен большой объём технологических и исследовательских работ и получен ряд новых результатов. Использование комплексного подхода, включающего в себя разработку и технологические аспекты создания гибридных структур, определяет высокий уровень диссертационной работы. Замечания: **1)** Одним из главных достижений защищаемой работы является демонстрация спин-зависимого транспорта методом Ханле. Однако вопрос о прямом наблюдении переключения магнетосопротивления в локальном и нелокальном транспорте не обсуждается должным образом. **2)** Исчезновение эффекта Ханле при $T = 80$ К объяснено как: «Такое сложное поведение может быть связано с «вымерзанием» носителей заряда в низколегированном Si ниже 120 К [162], что приводит к экспоненциальному падению концентрации дырок при низких температурах.» Однако согласно рисунку 4.3 (температурная зависимость сопротивления планарного устройства $\text{Fe}_{0,75}\text{Si}_{0,25} / \text{Si} (111)$), сопротивление между 120 и 80 К меняется не более, чем на 15 %. **3)** К общим замечаниям можно отнести следующие: На рисунке 1.1, представляющем схематичное изображение электрона, направление спинового момента и магнитного момента электрона совпадают, что является «классической» ошибкой. Для объяснения температурного поведения μ в $p\text{-Si}$ приводится ссылка на работу Зи, в связи с чем неясно, почему не была охарактеризована подложка, на которой проводились измерения.

Д.ф-м.н., профессор Логинов Юрий Юрьевич, проректор по научной и инновационной деятельности – официальный оппонент. Отзыв положительный. В диссертации автор последовательно и корректно использовала известные экспериментальные методы и технологии, а также разработала новые технологические подходы, которые оказались эффективными не только с фундаментальной точки зрения, но и нашли практическое применение, что подтверждается не только публикациями, но и полученным патентом. Таким образом, работа вно-

сит существенный вклад в решение ряда фундаментальных и практических задач. Замечания: 1) В работе не представлены результаты для $\text{Fe}_{0,75}\text{Si}_{0,25}$ на подложке $n\text{-Si}(111)$, или для высоколегированного кремния. 2) Соединение Co_2FeSi , описанное в пункте 3.2.2, слабо охарактеризовано. Возникают сомнения в конкретной заявляемой стехиометрии, учитывая способ получения данного сплава. 3) Ссылка [111] на странице 74 в тексте работы, не соответствует смыслу повествования (должна быть [150], в автореферате данная ошибка исправлена). 4) В тексте работы присутствуют опечатки. Так, на стр. 30 написано «фукцией» вместо «функцией». На стр. 43 в тексте диссертации «велмичину», должно быть «величину». На стр. 48 «минатуризации», вместо «миниатюризации». В редких случаях отсутствуют запяты.

Д.т.н., профессор Гюнтер В. Э. Отзыв положительный. Замечаний нет.

К.ф-м.н., Аникеев С. Г. Отзыв положительный. Замечаний нет.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается соответствием направлений научных исследований, выполняемых оппонентами и реализуемых в ведущей организации, тематике представленной диссертационной работы, наличием публикаций и высоких достижений в соответствующей области исследований.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

Разработана методика травления силицида железа $\text{Fe}_{1-x}\text{Si}_x$ с различным содержанием Si ($0 < x < 0,4$) с помощью жидкого химического травления. Впервые продемонстрирована немонотонная зависимость скорости травления от процентного содержания кремния в пленках $\text{Fe}_{1-x}\text{Si}_x$.

Разработан способ изготовления субмикронных нанопроволочных структур $\text{Au/Fe}_{0,75}\text{Si}_{0,25}$ на подложке $\text{Si}(111)$ методом перьевой нанолитографии.

Обнаружен и изучен эффект спиновой аккумуляции в трёхтерминальном устройстве, созданном на основе гибридной структуры $\text{Fe}_{0,75}\text{Si}_{0,25}/p\text{-Si}(111)$, который может быть использован для создания принципиально новых приборов.

Предложена качественная модель транспорта спин-поляризованных носителей заряда из силицида железа в кремний через поверхностные состояния на границе раздела.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что результаты исследования спиновой аккумуляции в гибридной структуре $\text{Fe}_{0,75}\text{Si}_{0,25} / p\text{-Si}(111)$ позволяют по-новому взглянуть на роль поверхностных состояний в спиновом транспорте через границу раздела ферромагнитный металл/кремний и открывают перспективы оптимизации гибридных структур посредством модификации границы раздела.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что *разработанный* способ изготовления субмикронных гибридных структур методом зондовой нанолитографии может найти применение в микроэлектронике, спинтронике и оптоэлектронике. Предложенный *способ изготовления* микронных устройств на основе метода жидкого травления совместим с современным микроэлектронным производством и может быть использован при формировании геометрии пленочных структур для устройств оптоэлектроники, фотоники и спинтроники.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что они получены с использованием комплексного подхода, включающего стандартизированные методики изучения транспортных характеристик, с применением прецизионного измерительного оборудования высокого класса точности. Полученные данные проведённых исследований согласуются с имеющимися теоретическими разработками и имеющимися экспериментальными результатами других авторов.

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном участии в постановке целей и задач настоящей диссертационной работы. Соискатель активно участвовала в получении данных и в научных экспериментах, изготовлении планарных устройств, проведении морфологических исследований образцов тонких плёнок и устройств методами атомно-силовой микроскопии, в отработке технологий травления, проектировании геометрии устройств, разработке техно-

логических маршрутов и изготовлении устройств. Автором проведена систематизация и интерпретация полученных результатов, она участвовала в их обсуждениях, в подготовке к публикации результатов исследований.

В ходе защиты диссертации критических замечаний высказано не было.

Соискатель Лукьяненко Анна Витальевна ответила на задаваемые ей в ходе заседания вопросы и согласилась с замечаниями.

На заседании 17.12.2021 г. диссертационный совет сделал вывод о том что диссертация представляет собой законченное исследование, содержит решение научной задачи, имеющей значение для разработки приборов и развития методов экспериментальной физики, соответствует критериям, установленным Положением ВАК РФ о порядке присуждения учёных степеней, и принял решение присудить Лукьяненко Анне Витальевне учёную степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2. – Приборы и методы экспериментальной физики.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 19 человек, из них – 7 докторов наук по специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики, участвовавших в заседании, из 23 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за присуждение ученой степени – 19, против присуждения ученой степени – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель
диссертационного совета 24.1.228.02
д.ф.-м.н., академик РАН

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.228.02
д.ф.-м.н., с.н.с.

17 декабря 2021 года



Шабанов В. Ф.

Втюрин А. Н.