

На правах рукописи



Лукьяненко Анна Витальевна

**СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОТЕРМИНАЛЬНЫХ
УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ ГИБРИДНЫХ СТРУКТУР
ФЕРРОМАГНЕТИК/Si**

1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Красноярск - 2021

Работа выполнена в Институте физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленном подразделении ФИЦ КНЦ СО РАН (ИФ СО РАН).

Научный руководитель: **Волков Никита Валентинович**,
д. физ.-мат. наук, профессор, генеральный директор Акционерное общество «Красноярский электровагоноремонтный завод», г. Красноярск, Россия

Официальные оппоненты: **Терещенко Олег Евгеньевич**, д. физ.-мат. наук, профессор, с.н.с., и.о. зав. лаб. физики и технологии гетероструктур, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Логинов Юрий Юрьевич, д. физ.-мат. наук, профессор, проректор по научной и инновационной деятельности, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», г. Красноярск, Россия

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Владивосток, Россия

Защита состоится

«17» декабря 2021 г. в 16:00 на заседании учёного совета 24.1.228.02 при ФИЦ КНЦ СО РАН по адресу: 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50, стр. 38.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФ СО РАН по адресу 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50, стр. 38 и на официальном сайте ИФ СО РАН <http://kirensky.ru>.

Автореферат разослан «25» октября 2021 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
24.1.228.02

доктор физико-математических наук,
профессор

Втюрин Александр Николаевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Разработка элементной базы на основе спин-зависимых явлений и материалов перспективна для многих областей человеческой деятельности. Устройства спинтроники имеют ряд преимуществ, таких как высокое быстродействие, энергонезависимость, бóльшая плотность записи и низкое энергопотребление. Спинтроника на основе металлов уже демонстрирует впечатляющие успехи, однако, в металлической спинтронике не существует аналога биполярного транзистора, как в *классической* электронике, и это сильно ограничивает её возможности. Спиновая инжекция носителя заряда в полупроводник является первым необходимым условием для добавления «функции» спина в традиционную электронику. Спинтроника на основе полупроводников может совместить лучшие качества полупроводниковой логики и магнитной памяти. Возможное направление на пути развития – разработка новых гибридных устройств полупроводник/ферромагнетик, которые могли бы играть роль, как логики, так и памяти и могли бы быть изготовлены в рамках одной технологии. Спинтроника тесно связана с нанотехнологиями и для создания «спинтронных» устройств необходимы не только соответствующие материалы, но и развитие технологий. Спиновое состояние электронов сохраняется на расстояниях меньших длины свободного пробега (несколько нанометров), поэтому основными элементами спинтроники являются наноразмерные структуры.

В настоящее время большое внимание уделяется поиску новых материалов, обеспечивающих эффективную генерацию спин-поляризованных токов, которые являются совместимыми с хорошо развитыми технологиями современной микро- и нано-электронной промышленности. Перед учеными, занимающимися развитием спинтроники, стоят три основные задачи. Первая – это генерация спиновых токов с высокой степенью спиновой поляризации. Вторая – управление спиновым состоянием электронов, для создания логических элементов. Третья задача – детектирование спинового тока для обеспечения считывания информации. Базовыми материалами спинтроники являются ферромагнитные металлы (такие как Fe, Co и Ni), перспективными считаются слабелегированные ферромагнитные полупроводники, полуметаллические ферромагнитные оксиды, сплавы Гейслера. Кремний является перспективным материалом для устройств спинтроники, поскольку симметрия решетки в этом материале сохраняет спиновое вырождение и, следовательно, устраняет спиновую релаксацию Дьяконова-Переля [1]. Вместе с тем, кремний является легким атомом со слабой спин-орбитальной связью, что приводит к большим временам спиновой релаксации [2]. В целом,

учитывая господство кремния в электронной промышленности, он является хорошим кандидатом для разработки устройств спинтроники.

В спинтронике на основе кремния остается много нерешенных вопросов, особенно в отношении низколегированного кремния. Для создания устройств спиновой электроники необходимо глубокое понимание физических процессов, влияющих на спиновое состояние в твердых телах. В связи с чем, реализация спин-зависимых транспортных явлений и их исследование в различных материалах, структурах и устройствах является основной мотивацией, как данной работы, так и многих других научных групп.

Целью диссертационной работы является разработка новых технологических подходов в изготовлении устройств на базе гибридных структур и исследование особенностей спин-зависимого электронного транспорта в них.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Разработать новые технологические подходы изготовления простейших микронных и субмикронных устройств на базе гибридных структур ферромагнетик/кремний.
2. Провести характеризацию изготовленных структур и устройств различными физическими методами, включая исследование транспортных характеристик.
3. Исследовать возможность реализации спин-зависимого электронного транспорта в изготовленных устройствах.

Научная новизна

1. Разработана технология травления силицида железа $Fe_{1-x}Si_x$ 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 $Fe_{1-x}Si_x$.
2. Разработана технология изготовления субмикронных нанопроволочных структур $Au/Fe_{0,75}Si_{0,25}$ на подложке Si(111) методом перьевой нанолитографии.
3. Обнаружен эффект спиновой аккумуляции в четырехтерминальном устройстве изготовленным на базе гибридной структуры $Fe_{0,75}Si_{0,25}/p-Si(111)$.
4. Предложена качественная модель транспорта спин-поляризованных носителей заряда из силицида железа в кремний через поверхностные состояния на границе раздела.

Практическая значимость работы

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 открывает перспективы улучшения гибридных структур посредством модификации границы раздела.

Предложен способ изготовления субмикронных гибридных структур $\text{Au} / \text{Fe}_{0,75}\text{Si}_{0,25}$ на подложке $\text{Si}(111)$ методом зондовой нанолитографии. Данный способ получения субмикронных структур может найти применение в таких областях как микроэлектроника, спинтроника и оптоэлектроника.

Предложен способ изготовления микронных устройств на базе гибридных структур $\text{Fe}_{1-x}\text{Si}_x / \text{Si}(111)$ с использованием метода жидкого травления. Эта технология травления может быть использована при формировании геометрии из плёнок силицида железа для устройств оптоэлектроники, фотоники и спинтроники. Предложенный в данной работе подход является совместимым с микроэлектронным производством.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации в рамках Мегагранта на создание лабораторий мирового уровня (контракт № 075-15-2019-1886).

Авторы выражают благодарность Российскому фонду фундаментальных исследований, Правительству Красноярского края, Фонду поддержки науки и технологий Красноярского края за финансирование исследовательских проектов № 16-42-243046, №16-42-242036 и №16-42-243060, № 18-42-243022, № 20-42-243007.

Работа частично поддержана в рамках конкурса УМНИК Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, договор № 13544ГУ/2018.

Положения, выносимые на защиту

1. Для получения субмикронных устройств из $\text{Au}/\text{Fe}_{0,75}\text{Si}_{0,25}$ на подложке $\text{Si}(111)$ предложен новый способ изготовления, который включает в себя процессы зондовой литографии и прецизионного процесса жидкого травления $\text{Fe}_{1-x}\text{Si}_x$ ($0 < x < 0,4$).

2. Технологические маршруты получения кремниевых полевых транзисторов, контактные площадки которых (исток и сток) изготовлены из тонких ферромагнитных плёнок Fe и Co_2FeSi . Ширина Si токовых каналов полученных устройств варьируется от 250 нм до 3 мкм.

3. Модель транспорта спин-поляризованных носителей заряда для гибридных структур $\text{Fe}_{0,75}\text{Si}_{0,25} / p\text{-Si}(111)$ с барьером Шоттки, учитывающая поверхностные состояния на границе раздела.

Апробация результатов работы

Результаты, включённые в диссертацию, были представлены и обсуждались на следующих международных и всероссийских конференциях:

Всероссийской научно-технической конференции «Системы связи и радионавигации» (Красноярск, 2015 г., 2016 г.), International conference «Spin physics, spin chemistry, and spin technology» (Санкт-Петербург, 2015 г.), Euro-Asian Symposium «Trends in MAGnetism», EASTMAG (Красноярск, 2016 г.), NANOSTRUCTURES: PHYSICS AND TECHNOLOGY 25th International Symposium (Санкт-Петербург, 2017), Moscow International Symposium on Magnetism MISM (Москва, 2017 г.), International Conference “Scanning Probe Microscopy” (Екатеринбург, 2018 г.), Asian School-Conference on Physics and Technology of Nanostructured Materials (Владивосток, 2018 г.), International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures (Санкт-Петербург, 2019 г.) Российская конференция по физике полупроводников (Новосибирск, 2019 г.), конкурс-конференция ФИЦ КНЦ СО РАН по секции «Физика» (Красноярск, 2 апреля 2020), XIII Сибирский семинар по высокотемпературной сверхпроводимости и физике наноструктур ОКНО-2021 (Новосибирск 24-25 мая 2021).

Работа докладывалась на научных семинарах лаборатории радиоспектроскопии и спиновой электроники, отдела кристаллофизики института физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН (Красноярск 2021 г.)

Публикации

Основные результаты по теме диссертации представлены в 6 статьях, опубликованных в рецензируемых журналах и индексируемых системой цитирования Web of Science и Scopus, и входящих в перечень ВАК РФ. Опубликовано более 20 тезисов в сборниках трудов всероссийских и международных конференций и симпозиумов. Список работ основных приводится в конце автореферата.

Личный вклад автора заключается в непосредственном участии в постановке целей и задач настоящей диссертационной работы, изготовление планарных устройств, проведение морфологических исследований образцов тонких плёнок и устройств методами атомно-силовой микроскопии. Отработке технологий травления. Проектирование геометрии устройств, разработке технологических маршрутов и изготовление устройств. Систематизация и интерпретация полученных результатов, участие в обсуждениях, подготовка и написание научных работ по результатам исследования.

Основное содержание работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка использованных источников. Общий объём составляет 158 страниц, включая 57 рисунков, 3 таблицы и 38 формулы. Список литературы состоит из 173 наименований.

Во **введении** дано обоснование актуальности выбранной темы исследования, сформулированы цели и задачи диссертации. Описана научная новизна, практическая значимость и структура работы, а также положения, выносимые на защиту.

В **первой** главе приводится обзор литературы по теме диссертации. В *пункте 1.1* приводятся определения основных понятий. В *пункте 1.2* рассматриваются спиновая поляризация в ферромагнитных и немагнитных материалах, механизмы спиновой релаксации и дефазировки. Описывается спиновая инжекция через интерфейс ферромагнитный металл/немагнитный материал, а также частный случай, когда происходит инжекция через интерфейс ферромагнетик / полупроводник. В *пункте 1.3* описывается экспериментальная методика по измерению спиновой аккумуляции в полупроводнике трехтерминальным методом Ханле. *Пункт 1.4* посвящён описанию структур ферромагнетик / кремний, в частности, обосновывается выбор гибридных структур Fe₃Si/Si. В *пункте 1.5* рассматриваются устройства спинтроники, как широко используемые в настоящее время, так и перспективные идеи, и прототипы новых устройств.

Во **второй** главе даётся описание использованных в работе экспериментальных методов и технологических подходов для получения гибридных структур и многотерминальных устройств. В *пункте 2.1* приводятся методы синтеза гибридных структур. Описан метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) и установка синтеза «Ангара». Метод МЛЭ [3] основан на молекулярной эффузии паров исходного вещества и последующей его кристаллизации на поверхности подложки. Он позволяет получать монокристаллы высокой чистоты, выращивать сверхтонкие структуры с контролируемой толщиной и резкими изменениями состава на границах. Приводится описание метода быстрого термического отжига и установки «STE RTA70H», которая позволяет проводить быструю температурную обработку в управляемой газовой среде. В *пункте 2.2* описаны методы исследований транспорта носителей заряда в микро- и наноструктурах. Перечислены методы исследования магнитных и структурных свойств образцов. Представлено использованное экспериментальное оборудование. В *пункте 2.3* перечислены методы, с помощью которых проводилось формирование геометрии устройств, и осуществлялся контроль геометрии полученных структур и устройств. Субмикронная литография выполнялась методом зондовой (перьевой) нанолитографии на установке атомно силовой микроскопии (АСМ) «NanoInk DPN 5000». Установка предназначена для прецизионной диагностики характеристик поверхности материалов, а также позволяет

проводить процессы литографии с субмикронным разрешением. Изготовление микроструктур проводилось с помощью метода оптической литографии на установке совмещения и экспонирования EVG 610. Для изготовления наноструктур был использован метод электронной литографии, на установке электронно-лучевой литографии VOYAGER.

В *пункте 2.4* приводится описание процесса синтеза силицида железа различного стехиометрического состава $Fe_{1-x}Si_x$ на подложке Si(111) с n-легированием ($\rho = 7,5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) при 400 К методом МЛЭ [4]. Всего было получено восемь образцов тонких плёнок с различным содержанием Si ($0 < x < 0,4$), параметры которых приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры эпитаксиальных плёнок $Fe_{1-x}Si_x$

№ Номер образца	Химический состав (в соответствии с PCA)		Толщина, Å	Средняя шероховатость R_a , нм	Скорость травления v , Å/сек
	Fe, %	Si, %			
1	60	40	700	1.24	1.8
2	67.2	32.8	524	1.45	9.1
<u>3</u>	<u>74.7</u>	<u>25.3</u>	<u>686</u>	<u>1.13</u>	<u>51.8</u>
4	82.7	17.3	1000	2.19	88.0
5	85.1	15.9	967	2.46	95.1
6	92	8	884	2.35	170.6
7	96.8	3.2	1008	2.30	152.7
8	100	0	250	1.17	52.6

В *пункте 2.5* описаны структурные *in situ* и *ex situ* исследования образцов. Контроль параметров эпитаксиальных пленок был проведён *in situ* на лазерном эллипсометре LEF 751M [5], с помощью дифракции быстрых отражённых электронов (ДБОЭ) и рентгеноструктурного анализа (PCA) *ex situ*. Структурные свойства пленок были исследованы методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на приборе Hitachi HT-7700 и атомно-силовой микроскопии (АСМ) на приборе NanoInk DPN 5000. Кристалличность выращенных слоев была количественно исследована с помощью метода Резерфордского обратного рассеяния (РОР) с использованием двух геометрий эксперимента (вдоль произвольного направления и вдоль оси зоны [19]). Химический состав образцов был подтвержден методами РОР и PCA. Структурная характеристика показала их высокое кристаллическое качество. Магнитные свойства плёнок были исследованы методом ферромагнитного резонанса (ФМР), Bruker Elexsys E580. Методом ФМР показано, что эпитаксиальные тонкие плёнки $Fe_{1-x}Si_x / Si$ обладают магнитной кристаллической анизотропией. Тонкие плёнки состава $Fe_{0,75}Si_{0,25} / Si$

имеют следующие магнитные параметры: намагниченность насыщения ($M_s = 995$ Гс), поле магнитной одноосной анизотропии $F_{ua} = 2.7$ Э, поле магнитной однонаправленной анизотропии $F_{ud} = 0.3$ Э, поле магнитной кубической анизотропии $F_c = 0.9$ Э, параметр мозаичности плёнки $\Delta\theta$ составляет 0.15° .

В *пункте 2.6* представлен простой и доступный способ травления тонких эпитаксиальных пленок $\text{Fe}_{1-x}\text{Si}_x / \text{Si} (111)$ с различным содержанием кремния ($0 < x < 0,4$) при помощи жидкого химического травления в растворе плавиковой и азотной кислот $\text{HF} : \text{HNO}_3 : \text{H}_2\text{O}$ (в пропорциях 1: 2: 400) [6]. Процесс травления был проведён для восьми образцов сплавов $\text{Fe}_{1-x}\text{Si}_x$. Скорости травления для каждого химического состава пленок сплава $\text{Fe}_{1-x}\text{Si}_x$ приведены в таблице 1. Обнаружена немонотонная зависимость скорости травления при изменении состава $\text{Fe}_{1-x}\text{Si}_x$. Определение скоростей травления обеспечивает возможность изготовления планарных многотерминальных структур из плёнок силицида железа различных стехиометрических составов. В *пункте 2.7* приводится описание технологических операций изготовления 4-х контактной структуры из плёнки $\text{Fe}_{0,75}\text{Si}_{0,25} / \text{Si} (111)$ методом оптической литографии и жидкого химического травления. На поверхности плёнки $\text{Fe}_{0,75}\text{Si}_{0,25} / \text{Si} (111)$, методом фотолитографии была сформирована защитная маска. Область пленки, покрытая фоторезистом, была защищена от раствора кислот, а остальная часть пленки была удалена в разбавленной смеси плавиковой и азотной кислот $\text{HF} : \text{HNO}_3 : \text{H}_2\text{O}$ (в пропорциях 1: 2: 400). Обработку поверхности проводили в течение ~ 52 секунд при постоянном перемешивании и температуре 22°C с последующей промывкой в дистиллированной воде.

В *третьей* главе уделяется внимание технологическим подходам формирования микро- и наноразмерных устройств на основе гибридных структур ферромагнетик/кремний. *Пункт 3.1* посвящён нанолитографии при помощи АСМ. Описан принцип зондовой нанолитографии с использованием метода перьевой нанолитографии на основе атомно-силового микроскопа [7]. Для проведения процесса нанолитографии была использована гибридная структура $\text{Au}/\text{Fe}_{0,75}\text{Si}_{0,25}/\text{Si}(111)$, полученная термическим испарением в условиях сверхвысокого вакуума (СВВ) на установке МЛЭ «Ангара» [4] при температуре $T=260^\circ\text{C}$. Использование метода МЛЭ обеспечивает получение гладких пленок, что является одним из важных факторов влияющих проведение процесса нанолитографии. АСМ характеристика поверхности $\text{Au}/\text{Fe}_{0,75}\text{Si}_{0,25}/\text{Si}(111)$ представлена на рисунке 1 (б), показала, что параметр среднеквадратичной шероховатости (S_q) плёнки составляет $\sim 0,6$ нм для области 1×1 мкм (и $\sim 1,3$ нм для области 70×70 мкм). Процесс изготовления структур субмикронного разрешения проходил в несколько этапов, схема изготовления представлена на рисунке 1 (а). Первый этап – формирование узора из $\text{C}_{16}\text{H}_{32}\text{O}_2\text{S}$ молекул, которые наносились на Au поверхность структуры $\text{Au}/\text{Fe}_{0,75}\text{Si}_{0,25}/\text{Si}(111)$ с помощью

зонда АСМ. Второй этап – это процесс жидкого химического травления верхнего слоя структуры Au/Fe_{0,75}Si_{0,25}/Si(111), при этом слой молекул используется в качестве защитной маски. Травление золота проводилось в растворе водной смеси 0,1 М Na₂S₂O₃, 1,0 М КОН, 0,01 М K₃Fe(CN)₆ и 0,001 М K₄Fe(CN)₆ в соотношении 1:1:1:1 (по объёму) при постоянном перемешивании и температуре раствора 22 С. Скорость травления Au составила ~ 0,6 нм/мин. Третьим этапом следовало травление слоя силицида Fe_{0,75}Si_{0,25} через полученную маску из золота, по уже описанному в *пункте 2.7* процессу. На рисунке 1 (в) представлено ПЭМ изображение полученной структуры с наноразмерным проволочным каналом шириной ~ 150 нм, из Au/Fe_{0,75}Si_{0,25} на подложке Si(111). Таким образом, описанный процесс может применяться для изготовления устройств с наноразмерными элементами из Au/Fe_{0,75}Si_{0,25}.

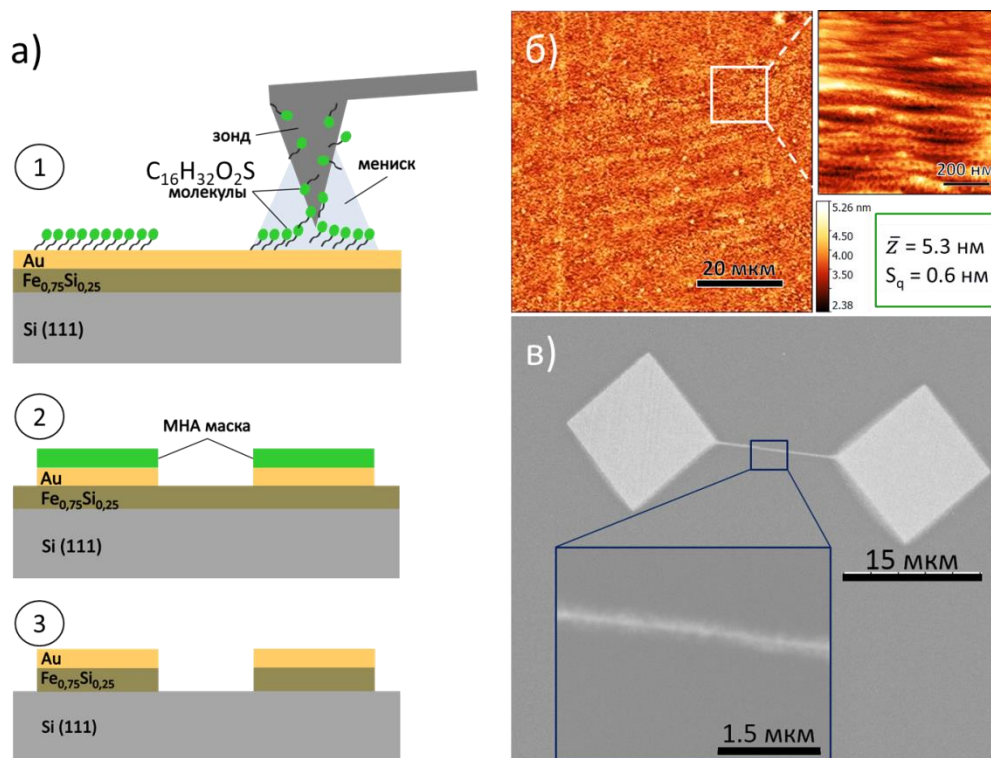


Рисунок 1 - схема изготовления структур при помощи процесса нанолитографии (а); АСМ изображение топологии поверхности Au / Fe_{0,75}Si_{0,25} / Si(111) структуры для областей сканирования 70×70 мкм и 1×1 мкм (б); СЭМ изображение структуры с наноразмерным проволочным каналом из Au/Fe_{0,75}Si_{0,25} на подложке Si(111) (в). Представлен общий вид структуры и увеличенное изображение канала

В *пункте 3.2* приводится описание технологических подходов к созданию активных устройств на основе полупроводниковых нанопроволок, а именно - полевых транзисторов Шоттки с нижним затвором и металлическим истоком и стоком, синтезированных на подложке кремния на изоляторе (КНИ). В качестве стока/истока транзисторов реализованы

ферромагнитный металл (Fe) и сплав Гейслера (Co_2FeSi). Исследования электрических характеристик изготовленных устройств проводились на постоянном токе с помощью установки EMPX-HF 2 (Lakeshore) с помощью двухканального источника-измерителя SourceMeter 2634b (Keithley).

Приведено описание технологического процесса изготовления полевых транзисторов Шоттки с нижним затвором и металлическим (Fe) истоком и стоком (рисунок 2 (а)). Проведена характеристика и измерены электрические характеристики полученных устройств. На рисунке 2 (б) представлены сток-затворные для устройства с шириной токового канала 400 нм. При развертке напряжения на затворе V_{GD} происходит резкий рост тока в канале I_{SD} , т.е. наблюдается открытие транзистора. Максимальное отношение тока “включенного” и “выключенного” транзистора составляет пять порядков. Установлено что устройства демонстрирует амбиполярные характеристики, т.е. проводимость практически не зависит от полярности затвора. Это свидетельствует в пользу того, что реализуется и n -, и p -тип проводимости.

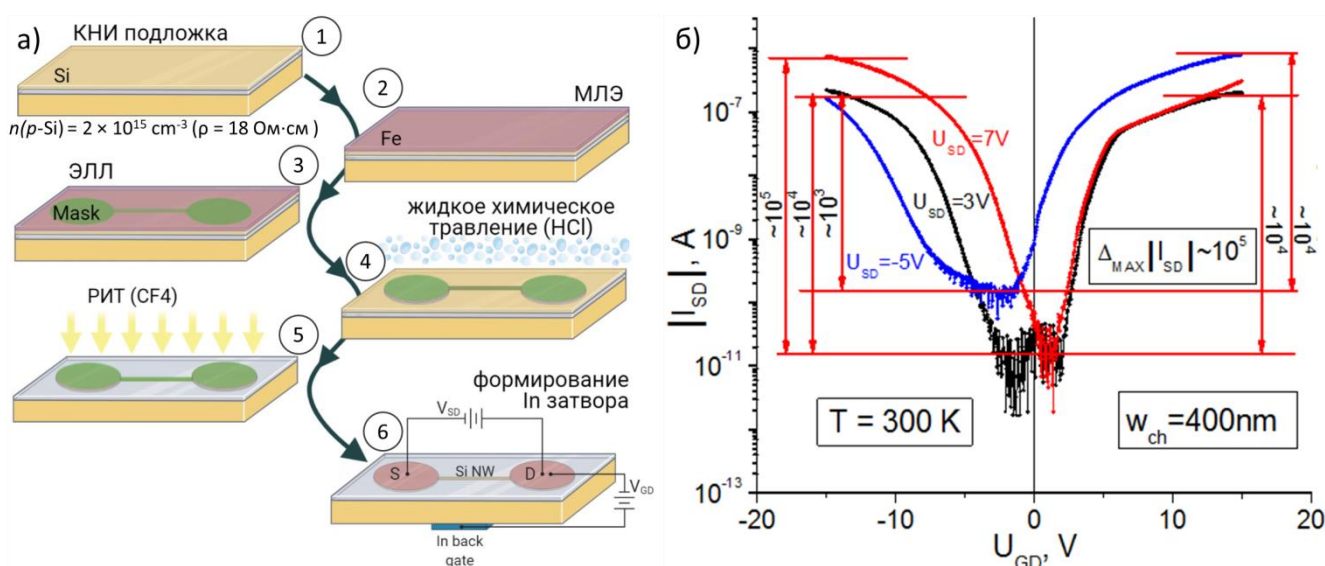


Рисунок 2 - Схема изготовления Fe/КМИ нанопроволочных транзисторов с нижним затвором (а). Перечислены основные этапы: подготовка подложки, очистка и отжиг в условиях СВВ для удаления естественного оксида с поверхности кремния (1); осаждение слоя Fe методом МЛЭ (2); этап электронной литографии (3); жидкое химическое травление слоя Fe в 5% растворе соляной кислоты (4); реактивное ионное травление слоя Si в плазме газа CF_4 (5); формирование электрода затвора с помощью индия (6), представлена схема измерений. Зависимость тока сток-исток (б) при 300 К и ширине транспортного канала 400 нм от напряжения на нижнем затворе при различных смещениях на стоке: -5 В (синий); 3 В (черный); 7 В (красный)

В работе представлен технологический процесс изготовления полевых транзисторов Шоттки с нижним затвором, используя процесс быстрого термического отжига для получения стока/истока транзистора из сплава Гейслера Co_2FeSi . Основные этапы технологического маршрута представлены на рисунке 3 (а) и включают следующие шаги: (1) формирование маски помощью процесса электронной литографии; (2) проведение реактивного ионного травления кремния; (3) термоокисление Si при температуре $1100\text{ }^\circ\text{C}$ в атмосфере сухого O_2 ; (4) этап оптической литографии; (5) травление слоя оксида SiO_2 в растворе плавиковой кислоты (HF) в области контактных площадок; (6) осаждение пленок Co и Fe (45 нм и 24 нм, соответственно) методом электронного лучевого напыления; (7) удаление маски; (8) процесс быстрого термического отжига для инициирования реакции образования силицида Co_2FeSi .

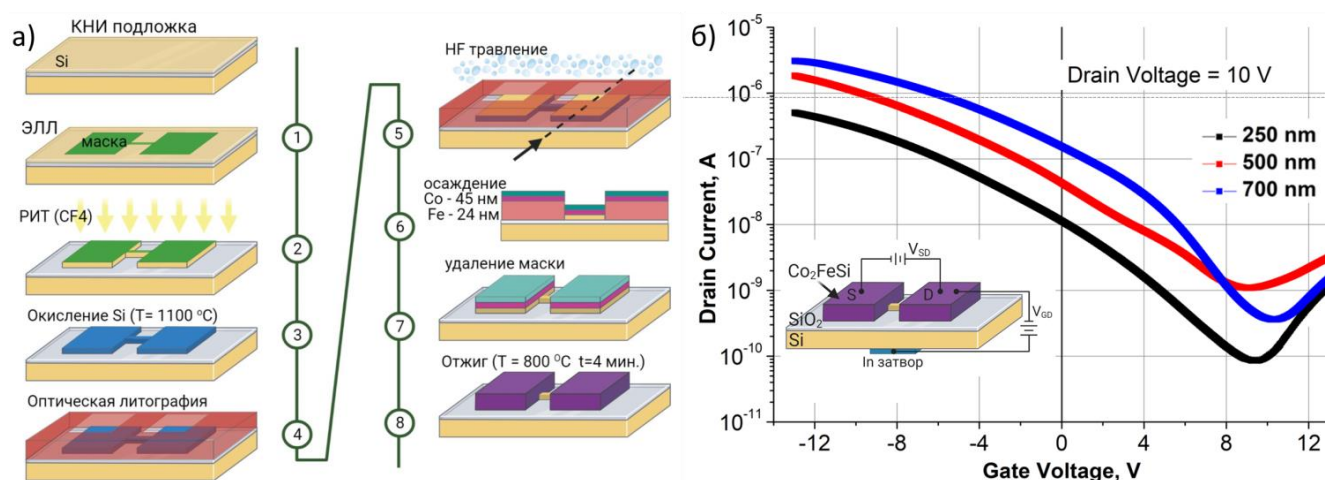


Рисунок 3 - Схема изготовления Co_2FeSi /КНИ нанопроволочных транзисторов с нижним затвором (а). Сток-затворные характеристики устройств (б) для различной ширины токового канала от 250 нм до 700 нм при 300 К. На вставке приведена схема измерений

Проведена характеристика и измерены электрические характеристики полученных устройств. На рисунке 3 (б) представлены сток-затворные характеристики устройств, которые демонстрируют поведение, типичное для псевдо-МОП-транзистора или нанопроволочного полевого транзистора с Шоттки контактами стока и истока. Проводимость токового канала носит немонотонный характер, Максимальный ток утечки наблюдается для устройства с Si-каналом шириной 700 нм.

В **четвёртой** главе приводятся результаты систематических исследований транспортных свойств гибридной структуры $\text{Fe}_{0,75}\text{Si}_{0,25}/\text{p-Si}(111)$ на постоянном и переменном токе, Исследования электронного транспорта проводились на измерительной установке собственной разработки в диапазоне температур от 4,2 К до 300 К.

Пункт 4.1 посвящён изготовлению планарного 4-х контактного устройства $\text{Fe}_{0,75}\text{Si}_{0,25}/\text{Si}(111)$, особое внимание уделяется контролю процесса изготовления и качеству полученных структур. Четырех-контактная планарная структура была изготовлена из плёнки состава $\text{Fe}_{0,75}\text{Si}_{0,25}/\text{Si}(111)$ с использованием процесса оптической литографии и жидкого химического травления в растворе плавиковой (HF) и азотной (HNO_3) кислот в воде (H_2O) с соотношением компонентов 1 : 2 : 400. Раствор кислот обеспечивал скорость травления $\sim 52 \text{ \AA}/\text{сек}$ для данного химического состава силицида железа. Для контроля процесса травления методом АСМ измерялся вертикальный профиль травления и шероховатость границы после процесса удаления пленки. Дополнительная проверка была выполнена с помощью магнитооптического эффекта Керра (в магнитном поле 250 Э), который позволил наглядно продемонстрировать удаление ферромагнитного материала после травления. Были проведены измерения транспортных свойств (рисунок 4) сплошной пленки $\text{Fe}_{0,75}\text{Si}_{0,25}$ и 4-х контактной планарной структуры на основе $\text{Fe}_{0,75}\text{Si}_{0,25}$.

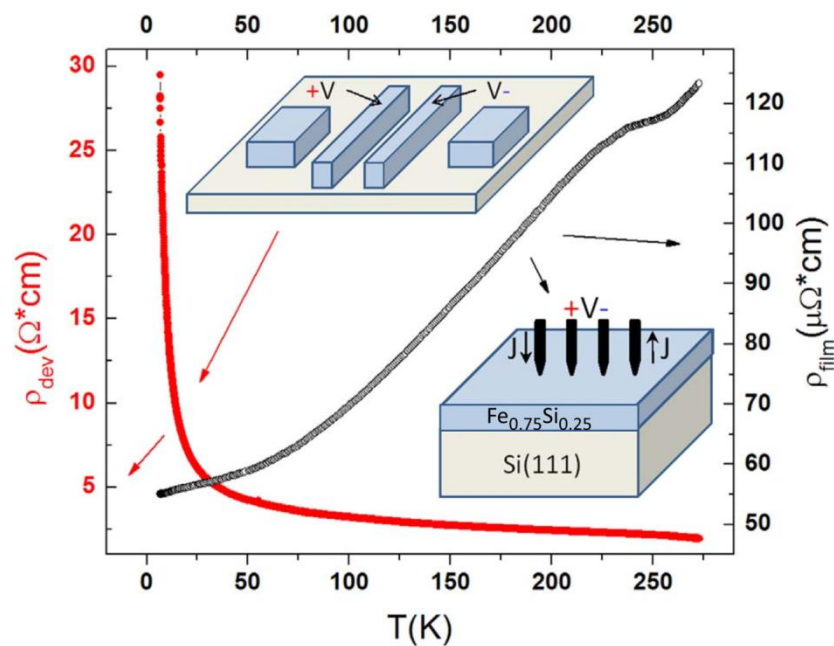


Рисунок 4 - Температурные зависимости сопротивления сплошной пленки $\text{Fe}_{0,75}\text{Si}_{0,25}$ (правая ось) и планарного устройства $\text{Fe}_{0,75}\text{Si}_{0,25} / \text{Si}(111)$ (левая ось). На вставках показаны экспериментальные геометрии для обоих образцов

Температурная зависимость удельного сопротивления $\text{Fe}_{0,75}\text{Si}_{0,25}$ демонстрирует типичное металлическое поведение. Значение удельного сопротивления возрастает с $55 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$ при 4,2 К до $120 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$ при 300 К, что сопоставимо с другими полученными результатами [8, 9]. В районе 250 К на кривой сопротивления наблюдается перегиб (черная кривая на рисунке 4), это можно интерпретировать как переключение токового канала. Такое явление было

обнаружено в различных пленках, таких как $\text{Cu}_{80}\text{Co}_{20}$ [10], Fe_3O_4 [11], Fe [12], LSMO [13] и других проводящих пленках, выращенных на подложке Si .

Пункт 4.2 посвящён изучению Эффекта Ханле в структуре $\text{Fe}_{0,75}\text{Si}_{0,25}/p\text{-Si}(111)$. По описанной в пункте 2.1 методике, на атомарно-чистой легированной бором кремниевой подложке $p\text{-Si}(111)$ (с удельным сопротивлением $7,5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$) были эпитаксиально выращены пленки $\text{Fe}_{0,75}\text{Si}_{0,25}$ (рисунок 5 (а)). Используя вышеописанную методику фотолитографии и жидкого химического травления, из структуры $\text{Fe}_{0,75}\text{Si}_{0,25}/p\text{-Si}(111)$ было изготовлено 3-х контактное планарное устройство (рисунок 5 (б)), расстояние между контактом № 2 и контактом № 3 составляет 10 мкм .

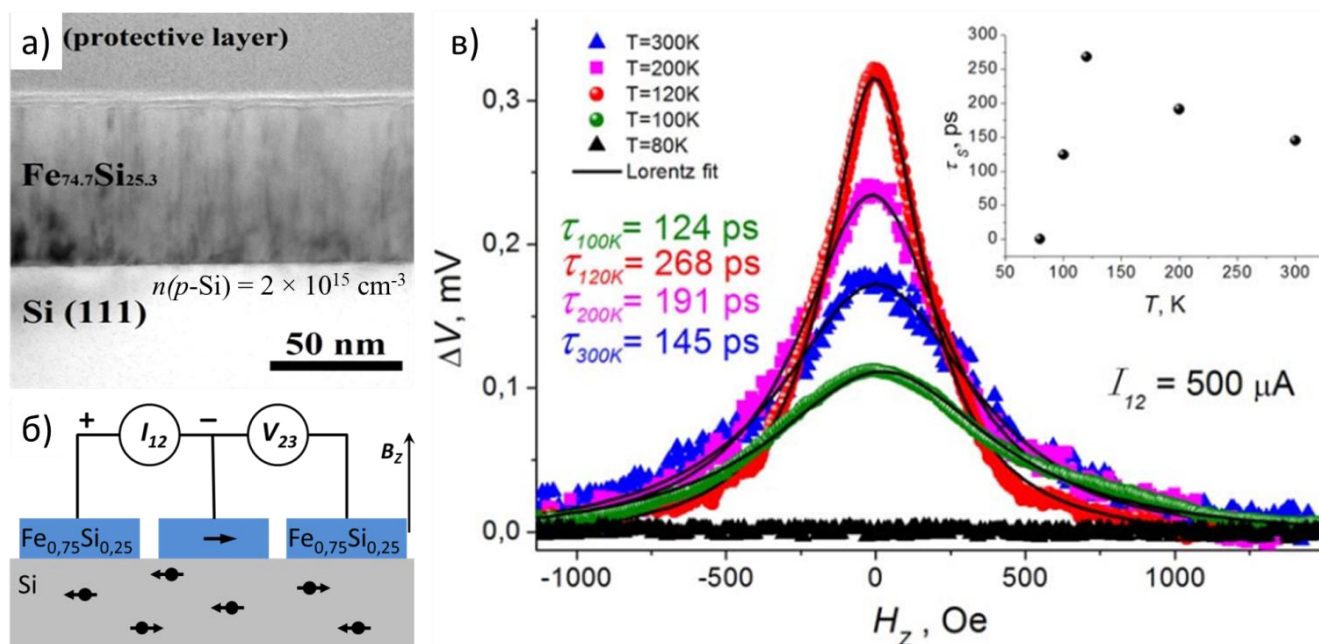


Рисунок 5 – ПЭМ изображение эпитаксиальной плёнки $\text{Fe}_{0,75}\text{Si}_{0,25}$ на подложке $p\text{-Si}(111)$ (а); экспериментальная схема 3-х контактного планарного микроустройства для изучения эффекта Ханле (б); кривые Ханле (в) для устройства $\text{Fe}_{0,75}\text{Si}_{0,25}/p\text{-Si}$ при $I_{12} = +500 \text{ мкА}$ и температурах 300 К , 200 К , 120 К и 100 К (символы) и аппроксимация функцией Лоренца (сплошные линии). На вставке представлена зависимость времени жизни спинового состояния (τ_s) от температуры

Зависимости сигнала напряжения ΔV_{23} от магнитного поля были измерены при токе смещения $I_{12} = 500 \text{ мкА}$ с использованием экспериментальной геометрии, показанной на рисунке 5 (б). Кривые для разных температур ведут себя одинаково и имеют форму Лоренцевых кривых (рисунок 5 (в)). Это свидетельствует о возникновении спиновой аккумуляции под контактом № 2 в соответствии с 3-Т методом Ханле, описанном в пункте 1.3. Поляризация инжектируемых носителей параллельна направлению намагниченности ферромагнитных контактов и лежит в плоскости образца. Магнитное поле приложено перпендикулярно плоскости образца и вызывает прецессию спина, что приводит к подавлению

спиновой аккумуляции. В эксперименте ток смещения I_{12} был положительным, т.е. контакт № 2 находился под отрицательным напряжением. Это означает, что устройство работает в режиме экстракции дырок. Следовательно, спиновая аккумуляция вызвана спин-зависимой экстракцией дырок из кремния в $\text{Fe}_{0,75}\text{Si}_{0,25}$. Более того, спиновой сигнал наблюдается только в перпендикулярном магнитном поле (как показано на рисунке 5 (б)), то есть, реализован прямой эффект Ханле.

Аппроксимируя экспериментальные данные функцией Лоренца (рисунок 5 (в)), было извлечено значение подгоночного коэффициента ω_L . Ширина аппроксимирующей кривой на ее полувысоте ΔB соответствует частоте прецессии спина и позволяет рассчитать время жизни спинового состояния:

$$\tau_s = 1/\omega_L = h/2\pi g_h \mu_B \Delta B, \quad (1)$$

где g_h - g-фактор Ланде для дырок ($g_h = 2$). Для рассматриваемого устройства экспериментальная аппроксимация кривой дает следующие значения: $\tau_s = 145$ пс, 191 пс, 268 пс и 124 пс для $T = 300$ К, 200 К, 120 К и 100 К соответственно. При 80 К сигнал исчезает и, следовательно, время жизни спинового состояния не может быть получено из аппроксимации экспериментальной кривой. Как видно на вставке к рисунку 5 (в), температурная зависимость времени жизни спинового состояния имеет немонотонный характер. Это можно объяснить зависящими от температуры подвижностью μ и длиной спиновой диффузии D электронов в кремнии. В нашем случае, согласно Зи [14], параметры μ и D в p -Si должны увеличиваться при охлаждении ниже комнатной температуры, следовательно, τ_s также должно увеличиваться. Аналогичные особенности времени жизни спинового состояния, наблюдались в n -Si и n -Ge в работах [15, 16], однако в рамках этой простой модели нельзя понять низкотемпературное поведение τ_s . Также этот эффект не может быть связан с какой-либо особенностью температурной зависимости и удельного сопротивления $\text{Fe}_{0,75}\text{Si}_{0,25}$, которое постепенно уменьшается от комнатной температуры до 4,2 К. Такое сложное поведение может быть связано с «вымерзанием» носителей заряда в низколегированном Si ниже 120 К [16], что приводит к экспоненциальному падению концентрации дырок при низких температурах.

Полученные значения времени жизни спинового состояния сопоставимы с другими опубликованными результатами для структур на основе кремния, исследованных с помощью 3-Т измерений. Например, для структуры с эпитаксиальным туннельным барьером $\text{MgO}(001)$ и электродом из $\text{Fe}(001)$, τ_s в высоколегированном p -Si составляет 133 пс [17]. Ранее сообщаемые [18] значения времени жизни спинового состояния в высоколегированном p -Si с туннельным барьером Al_2O_3 и различными ферромагнитными электродами составляли 60 пс, 110 пс и 270 пс

для электродов из Fe, Co и Ni₈₀Fe₂₀, соответственно. В другой работе [19] сообщается, что $\tau_s = 470$ пс в структуре ФМ/ПП Fe_{0,75}Si_{0,25}/n-Si с δ -легированным слоем с малой шириной барьера Шоттки. Однако важно отметить, что в нашем случае спиновая инжекция происходит в низколегированный кремний с относительно высоким удельным сопротивлением ($n = 2 \cdot 10^{15}$ см⁻³, $\rho = 7$ Ом · см). Кроме того, рассматриваемая структура Fe_{0,75}Si_{0,25}/p-Si не содержит диэлектрического слоя между ФМ и ПП. Согласно стандартной модели спиновой диффузии [20], эти два обстоятельства создают проблему рассогласования проводимости, которая должна была значительно уменьшить спиновый сигнал. Чтобы разобраться в причинах возникновения эффекта спиновой аккумуляции в рассматриваемом устройстве, были проведены дополнительные исследования.

В пункте 4.3 проводится анализ барьера Шоттки в структуре Fe_{0,75}Si_{0,25} / p-Si(111) и определение его параметров. Для определения характеристик барьера был подготовлен диод с омическим контактом на нижней стороне подложки и для него измерены вольтамперные характеристики (рисунок 6 (а)). ВАХ имеет разные прямую и обратную ветки, что свидетельствует о наличии барьера Шоттки. Прямая ветвь кривой ВАХ анализировалась по методу Чонга [21], это позволило рассчитать высоту барьера $\phi_{Bp} = 0,57$ эВ, коэффициент идеальности $n = 2,13$ и последовательное сопротивление $R_s = 60,8$ Ом барьера Шоттки. Полученные значения достаточны для спиновой инжекции, однако согласно литературным данным [22], для кремния с легированием $2 \cdot 10^{15}$ см⁻³, ширина обедненной области составляет около 700 нм. В этом случае зарядовый транспорт осуществляется за счет переноса заряда через барьер посредством термоэлектронной эмиссии, которая не может обеспечить сохранение спинового состояния при переносе зарядов через границу Fe_{0,75}Si_{0,25} / p-Si(111). Поэтому наличие барьера Шоттки шириной около 700 нм в рассматриваемой структуре, вряд ли может быть единственной причиной спин-зависимого транспортного эффекта.

В литературе встречается описание механизма спиновой инжекции путём двухступенчатого туннелирования через интерфейсные состояния [23]. Предполагая наличие таких состояний в нашей структуре и чтобы проверить это предположение, были выполнены дополнительные исследования электрических свойств границы раздела Fe_{0,75}Si_{0,25} / p-Si(111) методом импедансной спектроскопии.

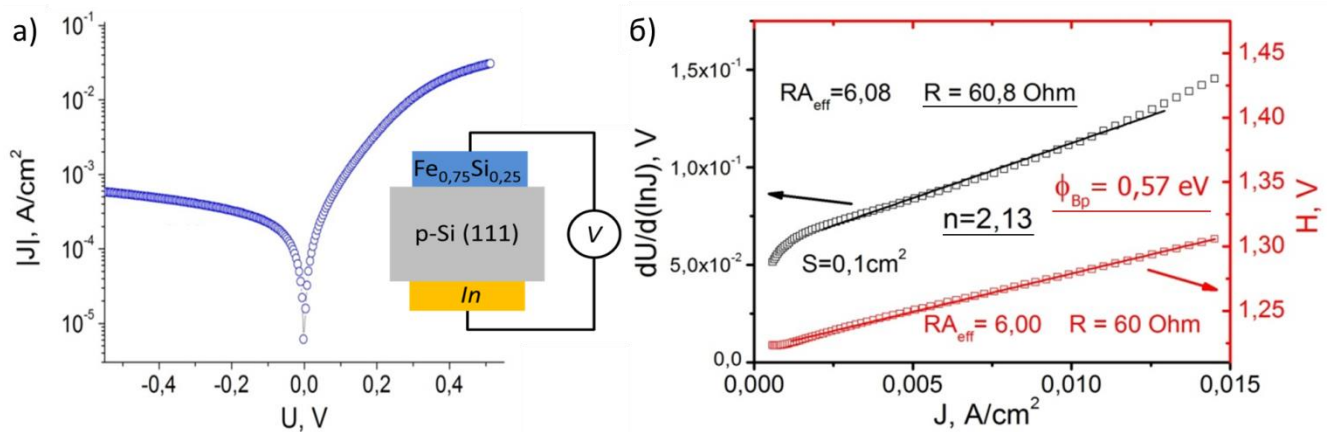


Рисунок 6 - ВАХ диода Шоттки Fe_{0,75}Si_{0,25} / p-Si(111) при 295 К (а); зависимости $dU/d(\ln J)$ от функции \ln (левая) и от J (правая) диода Шоттки Fe_{0,75}Si_{0,25} / p-Si(111) (б)

Пункт 4.4 посвящён поиску интерфейсных состояний с помощью импедансной спектроскопии границы раздела Fe_{0,75}Si_{0,25} / p-Si(111). Интерфейсные состояния – это энергетические состояния, уровни которых находятся на границе раздела металл/полупроводник или диэлектрик/полупроводник, и которые могут участвовать в транспорте носителей заряда. Ранее в литературе не встречается описания попыток обнаружить такие состояния методами оптической или импедансной спектроскопии. Предполагая, что в рассматриваемой структуре могут быть различные поверхностные и интерфейсные состояния, (вероятно, именно они вызывают наблюдаемый 3-Т сигнал ΔV_{23} , описанный в пункте 4.2), мы попытались обнаружить их с помощью импедансной спектроскопии (ИС) [24, 25, 26]. Для диода Шоттки Fe_{0,75}Si_{0,25}/p-Si были измерены температурные зависимости реальной и мнимой частей импеданса. При низких температурах наблюдается резкий пик на зависимостях активного сопротивления от температуры. Положение пика зависит от частоты, что указывает на наличие термически активируемого энергетического состояния. Можно оценить энергию интерфейсных состояний, используя выражение для скорости перезарядки [24]:

$$\langle \omega \rangle = 2CN_V \exp(-E_{LS}/k_B T) \beta^{-1}. \quad (2)$$

Здесь $\omega = 2\pi f$ угловая частота приложенного переменного напряжения, C – коэффициент захвата, k_B – постоянная Больцмана, β – фактор вырождения. Поскольку плотность состояний в валентной зоне определяется как $N_V(T) \sim T^{3/2}$ можно извлечь энергию локализованных состояний E_{LS} по наклону $\ln(\omega/T_P^{3/2})$ от $1/T_P$. Для извлечённого значения T_P наблюдаемого на частотах от 1 кГц до 250 кГц (рисунок 7 (а)), была определена энергия интерфейсного состояния на $E_{IS} = 40$ мэВ выше потолка валентной зоны в кремнии. Таким образом, было экспериментально показано наличие интерфейсных состояний в рассматриваемой структуре. Такая низкая энергия

означает, что эти состояния могут участвовать в процессах транспорта заряда на постоянном токе даже при комнатной температуре.

Учитывая определённую ранее высоту барьера Шоттки $\phi_{Bp} = 0.57$ эВ и обнаруженные локализованные интерфейсные состояния $E_{LS} = 40$ мэВ, была построена диаграмма энергетических зон и предложена схема переноса спин-поляризованных носителей заряда через интерфейс $Fe_{0,75}Si_{0,25}/p-Si(111)$ (рисунок 7 (б)).

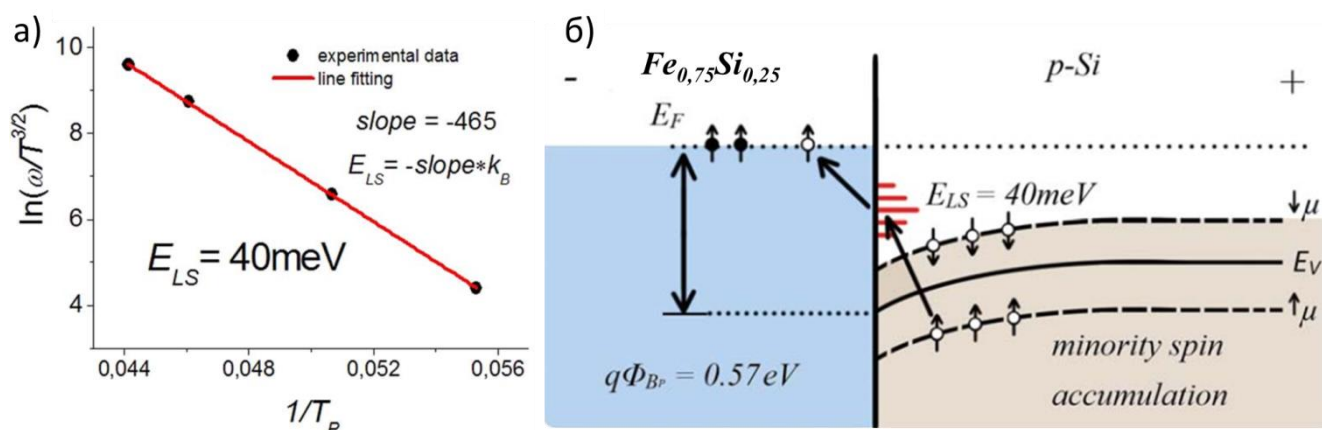


Рисунок 7 - График зависимости $\ln(\omega/T_P^{3/2})$ от $1/T_P$ (а). Схематическая зонная диаграмма (б), изображающая перенос спин-поляризованных дырок через переход $Fe_{0,75}Si_{0,25}/p-Si$ при помощи туннелирования через локализованные интерфейсные состояния

Во время эксперимента на контакт № 2 (рисунок 5(б)) подавалось отрицательное смещение, т. е. устройство работало в режиме экстракции дырок из кремния. Дырки из валентной зоны кремния туннелируют через локализованные состояния в ферромагнитный электрод (силицид). Поскольку в ферромагнетике имеется расщепление спиновых подзон, дырочный ток из кремния становится спин-поляризованным. Если в силициде кремния преобладает поляризация вверх, тогда в валентной зоне кремния будет происходить спиновая аккумуляция со спином вниз.

Таким образом, было рассмотрено несколько причин для объяснения экспериментально наблюдаемого эффекта спиновой аккумуляции. Ярко выраженный спиновый сигнал ΔV_{23} обусловлен наличием локализованных интерфейсных состояний на границе раздела $Fe_{0,75}Si_{0,25}/p-Si$. Наблюдаемый эффект спиновой аккумуляции при комнатной температуре, указывает на возможность создания спинтронных устройств на основе структур ФМ/ПП без туннельного диэлектрического барьера. Представленные экспериментальные результаты могут помочь глубже понять явления спинового транспорта в структурах ФМ/ПП.

Заключение

В ходе работы были разработаны новые технологические подходы изготовления субмикронных устройств на базе гибридных структур ферромагнетик/полупроводник с привлечением различных подходов литографии и комплекса методов травления. Проведены систематические исследования физических свойств гибридных структур $\text{Fe}_{1-x}\text{Si}_x/\text{Si}$ ($0 < x < 0,4$) и устройств на их основе. Выполнены исследования спин-зависимого электронного транспорта в гибридных структурах и устройствах на основе $\text{Fe}_{0,75}\text{Si}_{0,25}/p\text{-Si}(111)$.

Основные выводы, полученные в ходе выполнения диссертационной работы:

1. Исследованы физические свойства гибридных структур $\text{Fe}_{1-x}\text{Si}_x/\text{Si}$ ($0 < x < 0,4$). С помощью рентгеноструктурного анализа показано их высокое кристаллическое качество. Методом ферромагнитного резонанса установлено, что эпитаксиальные тонкие плёнки $\text{Fe}_{0,75}\text{Si}_{0,25}/\text{Si}$ обладают магнитной кристаллической анизотропией, и имеют следующие магнитные параметры: намагниченность насыщения ($M_s = 995$ Гс), поле магнитной одноосной анизотропии $F_{ua} = 2.7$ Э, поле магнитной однонаправленной анизотропии $F_{ud} = 0.3$ Э, поле магнитной кубической анизотропии $F_c = 0.9$ Э, параметр мозаичности плёнки $\Delta\theta$ составляет 0.15° .

2. Разработаны новые технологические подходы изготовления микронных и субмикронных устройства на базе гибридных структур ферромагнетик/полупроводник, которые включают в себя процессы литографии и травления. Разработана методика и изготовлены структуры из $\text{Au}/\text{Fe}_{0,75}\text{Si}_{0,25}$ на подложке $\text{Si}(111)$. Показана возможность использования процесса перьевой нанолитографии для создания структур различной геометрии с размером элементов от 150 нм. Предложены технологические маршруты получения полевых транзисторов, контактные площадки которых (исток и сток) изготовлены из тонких ферромагнитных плёнок Fe и Co_2FeSi . Методом АСМ показано что ширина Si токового канала варьируется от 250 нм до 3 мкм. Для изготовленных полевых транзисторов измерены электрические характеристики, которые показывают, что в зависимости от направления смещения подаваемого на затвор, устройства демонстрируют амбиполярные характеристики с проводимостью p - и n -типа.

3. Используя 3-х контактный метод Ханле, в устройствах $\text{Fe}_{0,75}\text{Si}_{0,25}/p\text{-Si}(111)$ обнаружен эффект спиновой аккумуляции. Из аппроксимации экспериментальных кривых определено время жизни спинового состояния в диапазоне температур от 100 до 300 К. Максимальное τ_s составляет 268 пс и наблюдается при температуре 120 К. Проведено исследование свойств границы раздела $\text{Fe}_{0,75}\text{Si}_{0,25}/p\text{-Si}(111)$ методом импедансной спектроскопии, выявлены интерфейсные состояния с энергией на $E_{IS} = 40$ мэВ выше потолка валентной зоны в кремнии. Предложена качественная модель транспорта спин-поляризованных носителей заряда из силицида железа в кремний через поверхностные состояния на границе раздела.

Список работ, опубликованных по теме диссертации:

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. Lukyanenko A. V., Smolyarova T. E. Alternative technology for creating nanostructures using Dip Pen Nanolithography //Semiconductors. – 2018. – Т. 52. – №. 5. – С. 636-638.
3. Tarasov A. S., Bondarev I. A., Rautskii M. V., Lukyanenko A. V., et al. Room Temperature Spin Accumulation Effect in Boron Doped Si Created by Epitaxial $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{p-Si}$ Schottky Contact //Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2018. – Т. 12. – №. 4. – С. 633-637.
4. 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.
5. 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.
6. Лукьяненко А. В. и др. Технологический процесс изготовления активных устройств ферромагнетик/кремний и их транспортные свойства //Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2021. – №. 1. – С. 74-79.

Патенты:

1. Пат. 2743516 Российская Федерация, МПК В82В 3/00. Способ получения ферромагнитных наночастиц-дисков с помощью зондовой литографии и жидкого химического травления / Лукьяненко А.В., Тарасов А.С., Волков Н.В.; заявитель и патентообладатель ФИЦ КНЦ СО РАН. – № 2020125606; заявл. 27.07.2020; опубл. 19.02.2021, Бюл. № 5 – 10 с. : ил.

Список цитированной литературы:

-
- 1 D'yakonov Spin orientation of electrons associated with the interband absorption of light in semiconductors //Sov. Phys. JETP. – 1971. – Т. 33. – №. 5. – С. 1053-1059.
 - 2 Žutić I., Fabian J., Erwin S. C. Spin injection and detection in silicon //Physical review letters. – 2006. – Т. 97. – №. 2. – С. 026602.
 - 3 Эсаки Л. Молекулярно-лучевая эпитаксия и развитие технологии полупроводниковых сверхрешеток и структур с квантовыми ямами //Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры.(Под ред. Л. Ченга и К. Плога). Перев. с англ. под ред. акад. ЖИ Алферова и д. ф.-м. н. ЮВ Шмарцева.–М.: Мир. – 1989.

-
- 4 Varnakov S. N. et al. Automation of technological equipment for obtaining multilayer structures in an ultrahigh vacuum //Instruments and Experimental Techniques. – 2004. – T. 47. – №. 6. – C. 839-843.
- 5 Zakeri K. et al. Magnetic properties of epitaxial Fe₃Si/MgO (001) thin films //Physical Review B. – 2007. – T. 76. – №. 21. – C. 214421.
- 6 Harianto T. et al. Fabrication and current–voltage characteristics of Fe₃Si/CaF₂/Fe₃Si magnetic tunnel junction //Japanese Journal of Applied Physics. – 2008. – T. 47. – №. 8R. – C. 6310.
- 7 Haaheim J. et al. Dip Pen Nanolithography (DPN): process and instrument performance with NanoInk's Nscriptor system //Ultramicroscopy. – 2005. – T. 103. – №. 2. – C. 117-132
- 8 Vinzelberg H. et al. Transport and magnetic properties of Fe₃Si epitaxial films //Journal of Applied Physics. – 2008. – T. 104. – №. 9. – C. 093707.
- 9 Hung H. Y. et al. Strong crystal anisotropy of magneto-transport property in Fe₃Si epitaxial film //Journal of crystal growth. – 2011. – T. 323. – №. 1. – C. 372-375.
- 10 Dai J. et al. Channel switching and magnetoresistance of a metal-SiO₂-Si structure //Journal of Physics D: Applied Physics. – 2000. – T. 33. – №. 11. – C. L65.
- 11 Vikulov V. A. et al. Low-temperature conducting channel switching in hybrid Fe₃O₄/SiO₂/n-Si structures //Materials Science and Engineering: B. – 2016. – T. 211. – C. 33-36.
- 12 Volkov N. V. et al. Magnetic-field-and bias-sensitive conductivity of a hybrid Fe/SiO₂/p-Si structure in planar geometry //Journal of Applied Physics. – 2011. – T. 109. – №. 12. – C. 123924.
- 13 Volkov N. V. et al. Current-driven channel switching and colossal positive magnetoresistance in the manganite-based structure //Journal of Physics D: Applied Physics. – 2009. – T. 42. – №. 6. – C. 065005.
- 14 Sze S M and Ng K K 2006 Physics of Semiconductor Devices (New York: John Wiley & Sons) p 30 ISBN: 0-471-05661-8.
- 15 Hamaya K. et al. Qualitative study of temperature-dependent spin signals in n-Ge-based lateral devices with Fe₃Si/n+-Ge Schottky-tunnel contacts //Journal of Applied Physics. – 2013. – T. 113. – №. 18. – C. 183713.
- 16 Ishikawa M. et al. Spin relaxation through lateral spin transport in heavily doped n-type silicon //Physical Review B. – 2017. – T. 95. – №. 11. – C. 115302.
- 17 Spiesser A. et al. Electrical spin injection in p-type Si using Fe/MgO contacts //Spintronics V. – International Society for Optics and Photonics, 2012. – T. 8461. – C. 84610K.
- 18 Dash S. P. et al. Spin precession and inverted Hanle effect in a semiconductor near a finite-roughness ferromagnetic interface //Physical Review B. – 2011. – T. 84. – №. 5. – C. 054410

-
- 19 Fujita Y. et al. Room-temperature sign reversed spin accumulation signals in silicon-based devices using an atomically smooth Fe₃Si/Si (111) contact //Journal of Applied Physics. – 2013. – Т. 113. – №. 1. – С. 013916
- 20 Fert A., Jaffres H. Conditions for efficient spin injection from a ferromagnetic metal into a semiconductor //Physical Review B. – 2001. – Т. 64. – №. 18. – С. 184420
- 21 Cheung S. K., Cheung N. W. Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics //Applied Physics Letters. – 1986. – Т. 49. – №. 2. – С. 85-87.
- 22 Sze S M and Ng K K 2006 Physics of Semiconductor Devices (New York: John Wiley & Sons) p 84
- 23 Jansen R. et al. Injection and detection of spin in a semiconductor by tunneling via interface states //Physical Review B. – 2012. – Т. 85. – №. 13. – С. 134420.
- 24 Losee D. L. Admittance spectroscopy of impurity levels in Schottky barriers //Journal of Applied Physics. – 1975. – Т. 46. – №. 5. – С. 2204-2214.
- 25 Dueñas S. et al. Characterization of the DX centers in AlGaAs: Si by admittance spectroscopy //Journal of applied physics. – 1991. – Т. 69. – №. 8. – С. 4300-4305.
- 26 Volkov N. V. et al. 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. – Т. 104. – №. 22. – С. 222406.

Отпечатано в типографии Института физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН.

Тираж 70 экз. Заказ № 8. Объем 1,4 усл. печ. л. Формат 60×84/16.

660036, Красноярский край, г. Красноярск, Академгородок, д. 50, стр. 38