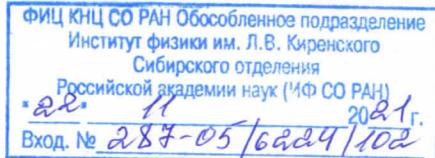


ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Лукьяненко Анны Витальевны «Создание и исследование многотерминальных устройств на основе гибридных структур ферромагнетик/Si» представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики

Диссертация Лукьяненко А.В. посвящена разработке новых технологических подходов к изготовлению устройств на базе гибридных структур ферромагнетик/кремний и исследованию транспорта носителей заряда в многотерминальных устройствах с барьером Шоттки. Актуальной научной проблемой наноэлектроники в общем, и спинtronики в частности, является разработка материалов и технологий, которые имеют высокую совместимость с современной электронной промышленностью. В настоящее время востребованы активные устройства, которые могут обеспечить возможность передачи данных с помощью спинового транспорта, по аналогии с классической электроникой. К перспективным системам, на основе которых могут быть реализованы спиновые устройства, относятся многослойные гибридные структуры – структуры, состоящие из ферромагнитных и полупроводниковых слоёв. Созданные на основе гибридных структур спиновые транзисторы смогут удовлетворить всем требованиям, предъявляемым к ним для построения «конкурентоспособных» высокопроизводительных чипов обработки информации. Выбор Si обусловлен, тем, что практически вся современная классическая электроника построена именно на этом полупроводнике, т.е., в этом случае органично решается вопрос интеграции элементов спиновых устройств в традиционные полупроводниковые схемы. А основные требования к ферромагнитному металлу – это высокая спиновая поляризация электронов проводимости и высокие температуры перехода в ферромагнитное состояние. Таким требованиям удовлетворяют элементарные 3d металлы, а также перспективные материалы для применения в спинtronике – ферромагнитные силициды. В связи с изложенным выше, тема диссертационной работы А.В. Лукьяненко, целью которой является разработка новых технологических подходов в изготовлении устройств на базе гибридных структур и исследование особенностей спин-зависимого электронного транспорта в них, является актуальной.



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 вносит существенный вклад в решение ряда фундаментальных и практических задач.

Диссертация Лукьяненко А. В. чётко структурирована, состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка использованных источников. Общий объём составляет 158 страниц. Список литературы состоит из 173 наименований. **Первая глава** является обзорной и посвящена теоретическим основам и экспериментальным подходам к изучению эффекта спиновой поляризации. **Во второй главе** даётся описание применяемого в работе технологического и аналитического оборудования и экспериментальных установок, которые использовались для решения поставленных в диссертационной работе задач. **Третья глава** посвящена разработке технологических подходов формирования микро- и наноразмерных устройств на основе гибридных структур ферромагнетик/кремний. Были использованы такие технологии как: нанолитография на основе СЗМ, и электронная и оптическая литография. В главе предложен новый способ изготовления субмикронных устройств из $\text{Au}/\text{Fe}_{0,75}\text{Si}_{0,25}$ на подложке $\text{Si}(111)$, который включает в себя процессы зондовой литографии и прецизионного процесса жидкого травления $\text{Fe}_{1-x}\text{Si}_x$ ($0 < x < 0,4$). В главе приводится технологический подход к созданию активных устройств на основе полупроводниковых нанопроволок, а именно - полевых транзисторов Шоттки с нижним затвором и ферромагнитными (Fe , Co_2FeSi) истоком и стоком, синтезированных на подложке КНИ. Сочетание развитых в работе методов с традиционными кремниевыми технологиями, позволит расширить функции существующих электронных устройств. **В четвёртой главе** проведены систематические исследования электронных транспортных свойств различных устройств $\text{Fe}_{0,75}\text{Si}_{0,25}/\text{Si}$ на постоянном и переменном токе. 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. Наблюдаемый эффект спиновой аккумуляции при комнатной температуре указывает на

возможность создания устройств спинtronики на основе структур ферромагнетик/кремний без туннельного диэлектрического барьера. Методом импедансной спектроскопии проведены исследования свойств границы раздела $Fe_{0,75}Si_{0,25}$ / p -Si(111), выявлены интерфейсные состояния с энергией на $E_{IS} = 40$ мэВ выше потолка валентной зоны в кремнии. Предложена схема транспорта спин-поляризованных носителей заряда через интерфейс $Fe_{0,75}Si_{0,25}/Si$ с учётом экспериментально обнаруженных интерфейсных состояний.

Привлекает внимание чёткая структура работы, логическая последовательность изложения результатов, обоснованность применяемых автором технологических подходов и экспериментальных методов. В тексте автореферата в полной мере отражено содержание работы, содержание автореферата соответствует основным идеям и выводам диссертации. В целом работа производит хорошее впечатление, логично построена, выглядит как **законченное исследование**, однако к **замечаниям** можно отнести:

- 1) В работе не представлены результаты для $Fe_{0,75}Si_{0,25}$ на подложке n -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 «функцией» вместо «функцией». На стр. 43 в тексте диссертации «величину», должно быть «величину». На стр. 48 «минатуризации», вместо «миниатюризации». В редких случаях отсутствуют запятые.

Следует подчеркнуть, что замечания не затрагивают основного содержания работы и не дают повода сомневаться в справедливости выводов, сделанных в диссертационной работе. Результаты, полученные в диссертации, **являются новыми**, выводы и защищаемые положения **обоснованы**. Уровень проведённых исследований высокий, что демонстрирует высокую квалификацию автора. Основные результаты работы представлены в 6 статьях, опубликованных в рецензируемых журналах и индексируемых системой цитирования Web of Science и Scopus, и входящих в перечень

ВАК РФ. Результаты работы докладывались на всероссийских и международных конференциях и симпозиумах.

Результаты исследования спиновой аккумуляции в гибридной структуре $Fe_{0,75}Si_{0,25} / p\text{-Si}(111)$ 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.

Считаю, что диссертационная работа А.В. Лукьяненко «Создание и исследование многотерминальных устройств на основе гибридных структур ферромагнетик/Si» **отвечает всем требованиям**, предъявляемым ВАК к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук и соответствует «Положению о порядке присуждения учёных степеней ВАК Российской Федерации», утверждённому постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842. Диссертация соответствует требованиям пункта 9 вышеупомянутого Положения, а её автор Лукьяненко Анна Витальевна, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.3. Приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент

доктор физ.-мат. наук (01.04.10 – физика полупроводников и диэлектриков), профессор, проректор по научной и инновационной деятельности Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева

Адрес: 660037, г. Красноярск,

пр. имени газеты «Красноярский рабочий», 31

Тел.: 8 913 838 9879

E-mail: loginov@sibsau.ru

Логинов Юрий Юрьевич 16.11.2021 г.



Подпись официального оппонента

Ю.Ю. Логинова удостоверяю:

Учёный секретарь Учёного совета СибГУ

А.Е. Гончаров

СПИСОК

избранных публикаций официального оппонента, д.ф.-м.н. Ю.Ю. Логинова за последние 5 лет по теме диссертации А.В. Лукьяненко «Создание и исследование многотерминальных устройств на основе гибридных структур ферромагнетик/Si»

1. Loginov Y. Y., Brown P. D., Kovalev I. V. Formation of dislocation loops and voids in electron irradiated zinc selenide single crystals //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2017. – Т. 255. – №. 1. – С. 012014.
2. Loginov Y. Y., Mozzherin A. V., Paklin N. N. Modeling structural defect formation in cadmium telluride during electron irradiation //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2019. – Т. 467. – №. 1. – С. 012007.
3. Volochaev M. N. et al. Features of large-scale thin foils fabrication for transmission electron microscopy by focused ion beam //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2020. – Т. 822. – №. 1. – С. 012028.
4. Volochaev M. N., Kveglis L. I., Loginov Y. Y. Lorentz microscopy methods for magnetic domain structure study //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2017. – Т. 255. – №. 1. – С. 012015.
5. Masyugin A.N., Aplesnin S.S., Loginov Y.Y., Bandurina O.N. Magnetoelectric effect in bismuth - Neodymium ferrite - Garnet films // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2020. – Т. 822. – №. 1. – С. 012025.

Официальный оппонент

доктор физ.-мат. наук (01.04.10 – физика полупроводников и диэлектриков), профессор, проректор по научной и инновационной деятельности Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева

Логинов Юрий Юрьевич 16. 11. 2021г.

Адрес: 660037, г. Красноярск,

пр. имени газеты «Красноярский рабочий», 31

Тел.: 8 913 838 9879

E-mail: loginov@sibsau.ru



Подпись официального оппонента

Ю.Ю. Логинова удостоверяю:

Учёный секретарь Учёного совета СибГУ

А.Е. Гончаров