

УТВЕРЖДАЮ

Директор
ФГБУН «Удмуртский федеральный
исследовательский центр Уральского
отделения Российской академии наук»
д.ф.-м.н., профессор
М.Ю. Альес



«17» февраля 2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

- Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук» на диссертацию Пешкова Ярослава Анатольевича «Фазовый состав, электронное строение и электротранспортные свойства многослойных наноструктур на основе CoFeV и CoFeZr », представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния

Актуальность диссертации определяется необходимостью получения полной и достоверной информации о влиянии фазового состава, технологических параметров, электронного строения и о межфазных взаимодействиях на интерфейсах на уникальные нелинейные электромагнитные свойства многослойных наноструктур. Нетривиальность объектов исследования обуславливается альтернативной стандартной архитектуре магниторезистивных устройств, в которой в качестве ферромагнитного слоя выступает нанокompозитный материал металл-диэлектрик, а немагнитным слоем являются различные полупроводники. При этом роль источника спин-поляризованного тока исполняют аморфные ферромагнитные сплавы CoFeV и CoFeZr , обладающие высокими значениями спиновой поляризации на уровне Ферми.

Потребность микроэлектронной промышленности в устройствах, не требующих дорогостоящего и высокотехнологического оборудования, привела к особому вниманию к многослойным нанокompозитным структурам из-за присутствия в них эффекта туннельного магнетосопротивления. В связи с этим, различными научными группами ведутся работы по проектированию и исследованию многослойных устройств и их особых физических свойств, что было отражено в литературном обзоре представленной диссертации.

В зависимости от выбранного состава, толщин слоёв и прослоек, межатомных взаимодействий на границах раздела в этих наноматериалах по-разному проявляются их электрические и магнитные свойства. Особое внимание заслуживают взаимодействия атомов d-металлов с окружающей диэлектрической и полупроводниковой матрицей, влияющие на макроскопические свойства наноструктур.

Диссертация Пешкова Я.А. посвящена исследованию закономерностей влияния фазового состава и микроструктуры на электротранспортные свойства многослойных наносистем на основе сплавов CoFeZr и CoFeB с различными полупроводниковыми прослойками, полученных оригинальным методом попеременного ионно-лучевого распыления составных мишеней.

Для определения влияния различий фазового состава и технологических параметров на характер химических связей, электрические и магнитные свойства, в диссертации был проведен целый комплекс исследований:

- методом рентгеновской дифракции была получена информация о кристаллическом строении многослойных наноструктур различного состава $[(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})/a-Si:H]_m$, $[(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_{35}(Al_2O_3)_{65}/a-Si]_m$, $[(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_{35}(Al_2O_3)_{65}/a-Si:H]_m$, $[(Co_{40}Fe_{40}B_{20})_{34}(SiO_2)_{66}/(In_2O_3)/C]_m$ и $[(Co_{40}Fe_{40}B_{20})_{34}(SiO_2)_{66}/(ZnO)/C]_m$;
- с использованием методов ультрамягкой рентгеновской эмиссионной спектроскопии и ИК-спектроскопии установлен характер межатомных

взаимодействий и химических связей на поверхности, в глубине и на границах раздела слоёв многослойных наноструктур;

- моделированием экспериментальных кривых рентгеновской рефлектометрии были получены данные о толщинах, плотностях и шероховатостях отдельных слоев наноструктур;
- исследования импедансной спектроскопией и установкой по измерению удельного электрического сопротивления дали информацию об особенностях переноса заряда и магниторезистивном эффекте многослойных наноструктур разного состава.

Обширный спектр исследований позволил расширить фундаментальные знания о характере межфазных взаимодействий в многослойных нанокompозитных структурах, их атомном и электронном строении, образовании химических связей на интерфейсах ферромагнитный слой - полупроводниковая прослойка, определяющих их электромагнитные свойства.

Таким образом, результаты, полученные в диссертационной работе, могут быть использованы не только для оптимизации технологических режимов изготовления, но и позволят управлять магниторезистивными свойствами сходных сложных устройств, что делает представленную работу **актуальной.**

Основные результаты, их новизна, научная и практическая значимость.

Положения, выносимые автором на защиту, и основные научные результаты получены впервые и являются оригинальными. Они вносят вклад в решение задач по установлению взаимосвязи между фазовым составом, электронным строением, межатомными взаимодействиями и электрическими и магнитными свойствами многослойных наноструктур. Полученные данные позволяют управлять толщинами, плотностями и характером взаимодействий на границах раздела слоёв и, как следствие, получать функциональные наноматериалы с заданными электротранспортными свойствами.

В диссертации Пешков Я.А. получил ряд новых результатов, представляющих научный и практический интерес, среди которых следует отметить следующие:

- Впервые установлено, что в многослойных наноструктурах с нанокompозитными слоями $\text{CoFeZr-Al}_2\text{O}_3$ и прослойками из аморфного кремния образуются различные силициды железа и кобальта, влияющие на магниторезистивные свойства наносистем.
- Моделирование кривых рентгеновской рефлектометрии продемонстрировало наличие слоистой трёхслойной системы в многослойных наноструктурах на основе $\text{CoFeB}[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}/(\text{In}_2\text{O}_3)/\text{C}]_m$ и $[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}/(\text{ZnO})/\text{C}]_m$, полученных ионно-лучевым распылением.
- Установлено наличие эффекта туннельного магнетосопротивления в трёхслойной наноструктуре $[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}/(\text{In}_2\text{O}_3)/\text{C}]_m$ и определено влияние толщины полупроводниковой двухслойной системы $\text{In}_2\text{O}_3/\text{C}$ на магниторезистивный эффект.
- Выявлено, что туннельное магнетосопротивление серии многослойных наноструктур с прослойками оксида индия и углерода определяется процессами спин-зависимого туннелирования не только между ферромагнитными кластерами внутри слоев нанокompозита, но и между кластерами из соседних слоев через промежуточные слои $\text{In}_2\text{O}_3/\text{C}$.
- Определена резистивно-емкостная связь между электропроводящими кластерами, которая соответствует модели нанокompозита предперколяционного состава.

Полученные экспериментальные данные серьезного объема с использованием разносторонних физических методов и установленные на их основе закономерности важны для оптимизации методов формирования и управления электромагнитными свойствами функциональных наноматериалов. Результаты диссертации могут быть полезными для организаций, занимающихся как созданием новых устройств спинтроники,

так и их изучением. Среди таковых можно отметить АО «Микрон» (г. Москва), ФТИ им. А.Ф. Иоффе (г. Санкт-Петербург), ННГУ им. Н.И. Лобачевского (г. Нижний Новгород), ФТИ УдмФИЦ УрО РАН (г. Ижевск) и другие.

Общие замечания по диссертации:

1. В описании метода ультрамягкой рентгеновской эмиссионной спектроскопии, применявшейся при выполнении исследований, приводятся эталонные спектры элементов и соединений, использованные для моделирования экспериментальных спектров мультислойных структур. Каким образом проводилось моделирование: спектры соответствующих соединений складывались с весовыми функциями, или каким-то другим способом? Ссылки на литературу имеются, но можно было бы привести хотя бы краткое изложение методики.

2. Автор диссертации приводит сведения о химическом составе исследуемых слоистых наноконпозитов на основании состава распыляемых методом реактивного ионно-лучевого распыления мишеней. Было бы полезно привести результаты аттестации состава полученных образцов в сравнении с составом исходных мишеней.

3. Имеются некоторые различия в количестве чередующихся слоев в структурах на основе $[\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}]_{35}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{65}/a\text{-Si}$ и $[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_{35}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{65}/a\text{-Si}:\text{H}]$ – 120 и 100, соответственно. При этом не приводится информация о результатах измерений толщины пленок с различным количеством слоев, но все образцы исследуются на трех глубинах – 10, 60 и 120 нм, что вызывает некоторое недоумение.

4. В тексте диссертации присутствуют орфографические и грамматические ошибки, имеются замечания к оформлению графиков, в подписях осей которых присутствуют надписи на английском языке.

Отмеченные замечания не снижают общей высокой оценки большого объема проведенной экспериментальной и теоретической работы, качества ее

апробации и не влияют на общую положительную оценку работы и достоверность сделанных выводов.

Приведенные в диссертации результаты, сделанные выводы и выдвигаемые на защиту положения соответствуют научной специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния. Автореферат диссертации полно отражает её содержание, а положения, выносимые на защиту, соответствуют основным результатам работы.

Заключение

Диссертация Пешкова Я.А. «Фазовый состав, электронное строение и электротранспортные свойства многослойных наноструктур на основе CoFeV и CoFeZr» представляет собой законченное исследование современных востребованных наноматериалов, используемых при создании различных устройств спинтроники и микроэлектроники.

Научные результаты, впервые полученные автором, имеют значение для физики конденсированного состояния, важны для понимания процессов формирования сложных многослойных наносистем и их влияния на физические свойства данных структур. Основные результаты диссертации докладывались на международных и национальных научных конференциях и семинарах. Представленные в диссертационной работе основные результаты и выводы обладают **научной аргументацией, практической значимостью полученных результатов**, подкреплены как экспериментальными данными, так и сопоставимостью с результатами других работ, представленных данными, опубликованными в ведущих отечественных и зарубежных изданиях.

Работа содержит достаточное количество иллюстраций, что облегчает восприятие результатов и подтверждает сделанные выводы.

В целом, представленный в диссертационной работе материал хорошо представлен и последовательно изложен. Каждая глава завершается

выводами, акцентирующими внимание на основных положениях, представленных к защите.

Диссертация представляет самостоятельный труд, дающий полное представление, как о состоянии проблемы влияния структурно-фазовых превращений на функциональные свойства наноматериалов, так и о научных результатах, полученных автором работы. Структура, содержание и оформление диссертации и автореферата отвечают требованиям нормативных документов, а тема диссертации полностью соответствует выбранной научной специальности. Автореферат в полной мере отражает основное содержание диссертации.

Пешков Я.А. имеет 17 научных работ по теме диссертации, из которых 4 статьи в ведущих научных изданиях, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертационных работ и включенных в международные базы данных Scopus и Web of Science. Результаты работы докладывались на Всероссийских и Международных научно-технических конференциях.

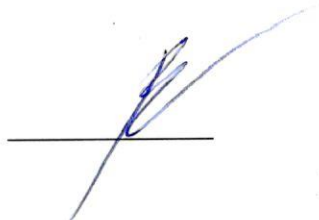
По объёму выполненной работы, актуальности полученных результатов, новизне и значимости основных положений, выносимых на защиту, диссертация представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, которая соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, в том числе критериям, установленным п.9-11, 13, 14 Положения «О порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 г. (с изменениями постановления Правительства Российской Федерации от 11 сентября 2021 г. №1539), а её автор, Пешков Ярослав Анатольевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 Физика конденсированного состояния.

Диссертационная работа, автореферат и отзыв на диссертацию Пешкова Ярослава Анатольевича рассмотрены и одобрены на объединенном

семинаре отделов физики и химии поверхности, физики и химии наноматериалов, теоретической физики ФТИ УдмФИЦ УрО РАН «14» февраля 2025 года.

Отзыв подготовил ведущий научный сотрудник Физико-технического института УдмФИЦ УрО РАН, к.ф.-м.н. по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Валеев Ришат Галеевич



Подпись Валеева Р.Г. заверяю:

Начальник отдела кадров



Вахромеева О.С.

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук»

Почтовый адрес: 426067. г. Ижевск, ул. им. Татьяны Барамзиной, 34

Телефон: 8 (3412) 50-82-00, 8 (3412) 50-88-10

E-mail: udnc@udman.ru