

## ОТЗЫВ

*официального оппонента*

на диссертацию Пешкова Ярослава Анатольевича «**Фазовый состав, электронное строение и электротранспортные свойства многослойных наноструктур на основе CoFeB и CoFeZr**», представленной на соискание степени кандидата физико-математических наук по специальности

1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Диссертационная работа Пешкова Ярослава Анатольевича посвящена изучению влияния фазового состава и структуры многослойных систем на основе ферромагнитных частиц CoFeB и CoFeZr на их магниторезистивные свойства.

Многослойные наноструктуры, состоящие из ферромагнитных слоёв и полупроводниковых прослоек, обладают уникальными свойствами, недоступными для объёмных материалов. К таким свойствам можно отнести туннельное магнетосопротивление, которое предопределяет использование таких наносистем в устройствах спинтроники, в магнитных датчиках и микроэлектронике. Особенностью материалов, исследуемых в диссертационной работе, является наличие магниторезистивного эффекта как в каждом отдельном ферромагнитном нанокompозитном слое, так и во всей многослойной наноструктуре. Такой дизайн устройств может увеличить значение магнетосопротивления, по сравнению с нанокompозитными системами металл-диэлектрик. Поэтому изучение межфазных взаимодействий на интерфейсах, толщин и плотностей отдельных слоёв, и, особенно, их влияние на электротранспортные характеристики многослойных наноструктур продолжает расширять знания в области производства устройств спинтроники. Кроме того, данное исследование развивает теоретические основы об особенностях межатомных взаимодействий на интерфейсах композитный магнитный нанослой/немагнитная прослойка, что делает диссертационную работу *актуальной*.

К одному из достоинств работы можно отнести целостность исследования в направлении фундаментального треугольника «состав-структура-свойство». Это создаёт переход от фундаментального изучения проблемы до широкого практического применения функциональных наноматериалов с заданными

свойствами. Отсутствие понимания природы возникновения электромагнитных свойств и их изменения, в зависимости от технологических параметров при формировании наноматериалов, затрудняет их использование в промышленном производстве, приводя к временным и финансовым потерям. Особенно следует отметить, что исследование таких сложных по составу и структуре систем, является непростой задачей даже в части разработки экспериментальных методик, а в части анализа и интерпретации полученных результатов задача еще усложняется, что требует высоких профессиональных компетенций. Для решения этих задач диссертант успешно воспользовался широким спектром современных экспериментальных методов изучения фазового состава и электронного строения материалов: рентгеновской дифракцией, рентгеновской рефлектометрией, ультрамягкой рентгеновской эмиссионной спектроскопией, ИК-спектроскопией, математическим моделированием экспериментальных данных. Для изучения электротранспортных свойств использовались установки для измерения магниторезистивного эффекта и импедансная спектроскопия.

**Основными результатами работы являются:**

- установление формирования силицидов железа и кобальта на интерфейсах слоёв и их влияния на значение туннельного магнетосопротивления в многослойных наноструктурах на основе CoFeZr с прослойками из аморфного кремния;
- оценка влияния гидрогенизации прослойки аморфного кремния на межатомные взаимодействия на границе раздела ферромагнитный слой/полупроводниковая прослойка и магниторезистивный эффект;
- продемонстрировано отсутствие эффекта туннельного магнетосопротивления в связи с использованием двухслойной системы ZnO/C в качестве немагнитной прослойки;
- определена хорошая периодичность многослойных наноструктур на основе CoFeV и существенное уменьшение плотности прослоек ZnO/C и In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/C, по сравнению с объёмными материалами;
- определено влияние толщины полупроводниковой прослойки In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/C на удельное электрическое сопротивление и туннельное магнетосопротивление.

**Достоверность** приведенных в диссертации результатов обеспечивается несколькими факторами: грамотным методическим подходом к проводимым исследованиям, набором методов и подходов, высокой компетенцией научных групп в составе которых работал соискатель. Представленная диссертация является не первой научной работой по созданию и изучению подобных объектов, что свидетельствует о многолетнем плодотворном сотрудничестве, и, как следствие, большом совместном накопленном опыте научных групп, вовлеченных в выполнение данной работы. На первом этапе были разработаны методики и подходы к изучению систем на основе бислоев  $\text{CoFeZr}$  с прослойками из аморфного кремния, частично изученных ранее. Далее, с помощью развития комплекса методов, были изучены более сложные трёхслойные наноструктуры на основе сплава  $\text{CoFeB}$ . Для верификации представленных в диссертации результатов использован комплекс современных взаимодополняющих методик с применением сертифицированного диагностического оборудования и программ математического моделирования. Серьёзный опыт и компетентность исследовательской команды в создании, изучении фазового состава, электронного строения и электротранспортных свойств нанокompозитных и многослойных систем признаны на мировом уровне. Выводы, сделанные в диссертации, следуют из полученных достоверных данных и не противоречат современным научным представлениям.

**Научная и практическая значимость** результатов, полученных в диссертационной работе Пешкова Я.А., обусловлена тем, что они расширяют современные фундаментальные представления о физико-химических процессах, происходящих при формировании функциональных наноматериалов, а именно об атомном и электронном строении, периодичности и межатомном взаимодействии на интерфейсах слоёв, фазовом составе ферромагнитных многослойных наноструктур на основе  $\text{CoFeZr}$  и  $\text{CoFeB}$  с различными полупроводниковыми прослойками. Именно характер межатомных взаимодействий при формировании наноструктур определяет их уникальные электротранспортные свойства. Результаты, полученные в ходе исследования, могут быть использованы для улучшения технологических режимов изготовления систем с магниторезистивными свойствами.

Текст автореферата в полной мере отражает содержание диссертационной работы. Выносимые на защиту положения соответствуют основным результатам и выводам работы. Главные аспекты диссертации опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК. По результатам диссертации опубликовано четыре статьи, входящие в международные базы цитирования WoS и Scopus, две из которых в высокорейтинговом журнале с квартилем Q2 по версии SJR (Surface and Interface Analysis). Работа прошла достаточную апробацию на 13 конференциях, в том числе международных. Содержание диссертации, приведенных результатов, сделанных выводов и выдвигаемых на защиту положений соответствует указанной специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Тем не менее, хотелось бы обратить внимание автора на ряд **замечаний**:

1. В первых главах работы достаточно подробно приведено обоснование выбора отдельных соединений, используемых в качестве ферромагнитной компоненты, полупроводниковой прослойки и диэлектрической матрицы для создания многослойных наноструктур. Однако из текста работы не совсем понятно, чем обусловлено варьирование составляющих исследуемых многослойных наноструктур, их разнородность. Например, почему для наноструктур на основе ферромагнитных сплавов CoFeV была использована матрица SiO<sub>2</sub> и прослойки In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/C, ZnO/C, а не матрица Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и прослойки *a*-Si, *a*-Si:H как для наноструктур CoFeZr.
2. При анализе Si L<sub>2,3</sub>-эмиссионных спектров ML - I и ML - II наноструктур на основе CoFeZr (3 глава) автор делает вывод об образовании низших силицидов ссылаясь на сопоставление с эталонными спектрами, которые представлены на рисунке 2.4.3 (глава 2), что несколько осложняет оценку полученных результатов. В то же время для ML - III и ML - IV результаты моделирования приведены. Для наглядности стоило хотя бы для одной из наноструктур (ML - I или ML - II) привести прямое сопоставление с эталонными спектрами. Так же следовало бы привести погрешности при регистрации эмиссионных спектров, так как: во-первых, как показано в работе, на глубине до 120 нм не удалось промоделировать спектры из-за высокой погрешности измерений для систем ML - I и ML - II, визуально

сложно оценить различия в спектрах на глубинах 10, 60 и 120 нм. Во-вторых, на основе моделирования экспериментальных спектров делается вывод о количественном фазовом составе образцов (в %) и погрешность измерений может быть важным моментом при определении этих значений. Рентгеновская эмиссионная спектроскопия показала высокую информативность при исследовании наноструктур на основе CoFeZr, однако при исследовании наноструктур на основе CoFeV она не применялась.

3. В общем диссертация аккуратно оформлена, написана понятным языком. В работе присутствует незначительное количество описок и стилистически неудачных выражений, не влияющих на восприятие материала, например: в главе 2, в разделе 2.5 нарушена последовательность нумерации рисунков (2.6.1, 2.6.2 и т.д. после 2.4.3 из раздела 2.4), в главе 3 дана ссылка на рисунок с эталонными данными 2.3.2, вместо 2.4.3 (с.70), «...структурные компоненты, меньшие характерных длин...» (с.12), «альтернативным путем переноса носителей заряда может возникнуть механизм...» (с.23), «для получения многослой...» (с.37), «...либо логарифмической функцией, предоставленной программой Fityk...» (с.40) и т.д.

В основном замечания носят рекомендательный характер и не влияют на высокий научный уровень диссертационного исследования..

### **Заключение**

В заключении следует отметить, что диссертация Пешкова Ярослава Анатольевича «Фазовый состав, электронное строение и электротранспортные свойства многослойных наноструктур на основе CoFeV и CoFeZr» 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.

Отзыв заслушан и обсужден на заседании кафедры физики наносистем и спектроскопии физического факультета Южного федерального университета 18 февраля 2025 года, протокол №9.

*Согласен на обработку моих персональных данных*

Официальный оппонент

Яловега Галина Эдуардовна

Доктор физико-математических наук

(специальность 01.04.07 – «физика конденсированного состояния»)

Доцент

ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»,

физический факультет,

кафедра физики наносистем и спектроскопии,

заведующий



ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»

Почтовый адрес: 344090 г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 5,

физический факультет ЮФУ

Тел.: +7(863) 218-40-00 доб.15001

Электронный адрес: yalovega@sfnu.ru

25.02.2025



подпись Яловега Г. Э.

секретарь Совета  
физического факультета  
Мирошниченко О.С.