

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Пешкова Ярослава Анатольевича «Фазовый состав, электронное строение и электротранспортные свойства многослойных наноструктур на основе CoFeV и CoFeZr», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния»

В текущем столетии стремительно развиваются исследования физических явлений в наноструктурированных материалах. Очевидно, что сформировалось новое научное направление, одним из объектов которого являются конденсированные среды с неоднородностями структуры нанометрового масштаба. Особый интерес среди этого класса материалов занимают гранулированные композиты металл-диэлектрик, в которых металлические частицы имеют субмикронный размер, наноразмеры порядка 3-10 нм и многослойные наноструктуры на их основе. Развитие науки и технологий подобных систем привело к масштабным исследованиям в них туннельного магнетосопротивления (ТМС), различающихся механизмами переноса носителей заряда и спина. Поэтому цель диссертации Пешкова Я.А., посвященной выявлению закономерностей влияния фазового состава, межфазных взаимодействий на интерфейсах, основных параметров многослойных наноструктур на электротранспортные и магниторезистивные свойства в системах: $[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})/a\text{-Si:H}]_m$, $[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_{35}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{65}/a\text{-Si}]_m$, $[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_{35}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{65}/a\text{-Si:H}]_m$, $[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}/(\text{In}_2\text{O}_3)/\text{C}]_m$ и $[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}/(\text{ZnO})/\text{C}]_m$, представляется актуальной, как с научной, так и с практической точек зрения.

Наиболее важными результатами, имеющими несомненную научную ценность, являются:

1. Впервые получены экспериментальные данные о кристаллической структуре, периодичности и толщинах нанослоев многослойных наноструктур

на основе ферромагнитных сплавов CoFeZr и CoFeV и полупроводниковых прослоек a -Si, a -Si:H, $\text{In}_2\text{O}_3/\text{C}$, ZnO/C , полученных ионно-лучевым распылением. Установлено, что межфазные взаимодействия на интерфейсах слоёв многослойных наноструктур, состоящих из нанокompозитных ферромагнитных слоёв $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_{35}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{65}$ с полупроводниковыми прослойками из аморфного кремния и гидрогенизированного аморфного кремния, сопровождаются образованием силицидов железа и кобальта.

2. Исследованы магниторезистивные свойства многослойных наноструктур $[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{V}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}/(\text{In}_2\text{O}_3)/\text{C}]_m$ и $[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{V}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}/(\text{ZnO})/\text{C}]_m$. Показано, что спин-зависимое туннелирование между кластерами CoFeV из соседних слоёв многослойной наноструктуры $[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{V}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}/(\text{In}_2\text{O}_3)/\text{C}]_m$, приводящее к возникновению эффекта туннельного магнетосопротивления, зависит от толщины аморфной полупроводниковой прослойки.

3. Впервые обнаружены межфазные взаимодействия на интерфейсах магнитный нанослой/немагнитная прослойка в многослойных наноструктурах $[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_{35}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{65}/a\text{-Si}]_m$, $[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_{35}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{65}/a\text{-Si:H}]_m$ и $[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})/a\text{-Si:H}]_m$. Установлено, что формирование низших силицидов железа Fe_3Si и кобальта Co_2Si на интерфейсах слоёв аморфных многослойных наноструктур $[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})/a\text{-Si:H}]_m$ и $[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_{35}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{65}/a\text{-Si:H}]_m$ приводит к снижению величины магнетосопротивления.

4. Показано, что гидрогенизация аморфного кремния в процессе ионно-лучевого распыления приводит к изменению механизма твердофазных реакций на интерфейсах слоёв с формированием моносилицида кобальта CoSi вместо моносилицида железа FeSi.

Практическая значимость работы заключается в том, что полученные результаты могут быть использованы для совершенствования технологии промышленного изготовления устройств спинтроники на базе многослойных наноструктур, содержащих ферромагнитные частицы CoFeZr и CoFeV. Установленные основные закономерности поведения и взаимосвязь между

межатомными взаимодействиями на интерфейсах, морфологией, периодичностью микроструктуры, плотностью нанослоев и электротранспортными и магнитными свойствами позволят управлять необходимыми электромагнитными свойствами функциональных наноматериалов следующего поколения.

Достоверность и обоснованность основных положений и выводов диссертации обеспечивается использованием широкого арсенала методов исследования (рентгеновская дифрактометрия (РД), рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС), инфракрасная спектроскопия (ИК) и других), поверенного аналитического оборудования, средств испытаний и измерений. Представленные в работе результаты исследования хорошо согласуются между собой.

В качестве **замечаний** можно отметить следующие:

1. При выборе материала прослойки исследуемых многослойных структур на основе нанокompозитных ферромагнитных слоёв с CoFeZ ($Z=\text{V}, \text{Zr}$) автор обосновывает добавление к широкозонным полупроводникам In_2O_3 и ZnO слоя из углерода повышением стабильности эксплуатационных характеристик пленок. Однако такой подход оправдан при использовании оксидных полупроводников в серийно выпускаемых тонкопленочных транзисторах прозрачной электроники в качестве проводящих каналов, когда приходится выбирать между стабильностью работы и ухудшением рабочих характеристик прибора. В случае же исследовательской работы, когда требуется установить физическую природу влияния прослойки на магниторезистивный эффект, лучше ограничиться более простой структурой прослойки.

2. В тексте диссертации, автор описывает изменение характера спин-зависимого туннелирования между ферромагнитными кластерами CoFeV в многослойной наноструктуре с полупроводниковой прослойкой из оксида индия и углерода, а также влияние толщины прослойки на величину туннельного магнетосопротивления. Однако автор недостаточно внимания

уделяет физическому объяснению зависимости толщины немагнитной прослойки на магниторезистивный эффект.

3. При описании Si $L_{2,3}$ ультрамягких рентгеновских эмиссионных спектров многослойных структур на глубинах анализа до 10 нм, 60 нм и 120 нм (рис. 3.1.2, 3.4.4) автор приводит сравнение положения максимумов с положением уровня Ферми, который бы не мешало показать в виде отдельной стрелки.

4. В тексте диссертации имеются также замечания по оформлению работы:
- нумерация рисунков и таблиц не соответствует ГОСТу по оформлению работы и включает номера разделов, а не глав;
 - с новой страницы автор начинает разделы, а не главы работы, что приводит к большому количеству неполных страниц;
 - литература приводится через один интервал.

Однако, вышеперечисленные недостатки носят характер пожеланий для будущей работы и не снижают общей положительной оценки диссертации.

Рассматривая диссертационную работу Пешкова Я.А. в целом, следует отметить, что она является законченной научно-исследовательской работой, обладающей актуальностью, новизной, научной и практической значимостью. Основные результаты работы достаточно подробно опубликованы в виде научных статей в ведущих зарубежных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, в том числе индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus. Содержание диссертации с необходимой полнотой отражено в автореферате.

Диссертация Пешкова Я.А. «Фазовый состав, электронное строение и электротранспортные свойства многослойных наноструктур на основе CoFeV и CoFeZr» выполнена на высоком научном уровне и своей актуальностью, степенью обоснованности положений, результатов и выводов соответствует всем критериям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Пешков Ярослав Анатольевич заслуживает присуждения ученой степени

кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 - физика конденсированного состояния.

Согласен на обработку моих персональных данных

Официальный оппонент, профессор
кафедры твердотельной электроники
Воронежского государственного
технического университета,
д.ф.-м.н. (специальность 01.04.07),
профессор

Юрий Егорович Калинин

16.02.2025 г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Воронежский государственный технический
университет».

Почтовый адрес: 394026, г. Воронеж, Московский проспект, 14.

Тел.: +7 (473) 246-66-46

E-mail: kalinin48@mail.ru

Подпись профессора кафедры твердотельной электроники факультета
радиотехники и электроники ВГТУ
Ю.Е. Калинина удостоверяю:

Ученый секретарь



В.П. Трофимов