

ОТЗЫВ

Официального оппонента

на диссертацию Маликова Ильи Валентиновича

«Эпитаксиальные пленки тугоплавких, ферромагнитных и половинных металлов: получение, свойства и структуры на их основе», представленную им на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности

2.2.2 – Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств

Актуальность исследований. Поиск новых низкоразмерных объектов с особыми электрическими и магнитными свойствами открывает широчайшие перспективы для создания компонентов электронной техники. Новые явления, обусловленные размерными эффектами, такими как отрицательное изгибное сопротивление, гигантское магнитосопротивление и другие, очевидно, выходят за рамки классической схемы проектирования материалов с оптимальными свойствами на основе физико-химического анализа. Значительно усиливается роль метода получения материала. Из-за высоких энергий индивидуальных частиц не удастся четко разделить области термодинамического и кинетического контроля происходящих процессов. К сожалению, теория эпитаксиального роста пленок еще далека от завершения и, по выражению автора диссертации, скорее, остаётся искусством.

Критическая роль в формировании свойств объектов исследования принадлежит их поверхности, которая мало того, что занимает значительную долю в объеме наноструктурированных материалов, но и является элементом, ответственным за многие эффекты, в частности, в структурах с большими длинами свободного пробега электронов.

Таким образом, есть основания считать, что предложенная автором цель работы: выращивание и исследование высококачественных эпитаксиальных пленок тугоплавких (Mo, Nb, W), ферромагнитных (Ni, Fe) и половинных металлов (Fe_3O_4 , сплавы Гейслера) для возможного применения в микро- и нанoeлектронике, фотонике, микросистемной технике и других областях; -

является актуальной и значимой как для развития микроэлектронной промышленности, так и для фундаментальной науки.

Достоверность и обоснованность научных результатов и выводов диссертации обеспечена корректным применением комплекса взаимодополняющих методик экспериментального и теоретического исследования, адекватных целям и задачам диссертации, привлечением обширного экспериментального материала и его количественным и качественным анализами. Достоверность выводов подтверждается сравнительным анализом результатов, полученных в ходе выполнения данной работы, и теоретических и экспериментальных данных, приведенных в публикациях других авторов, а также определяется использованием уникальных авторских разработок. Измерения проводились на больших выборках при помощи адаптированных к задачам методов анализа. Достоверность представленных в диссертации результатов обусловлена также их обсуждением на многочисленных научных конференциях и семинарах.

Научная и практическая значимость работы определяется разработкой научно-обоснованной лабораторной технологии выращивания тонких высококачественных эпитаксиальных структур на основе тугоплавких металлов Mo и Nb методом импульсного лазерного осаждения в сверхвысоком вакууме. Предложен подход к зондовой литографии с использованием оксидной маски, позволяющий значительно расширить её возможности. Раскрыты новые возможности управления проводимостью гетероэпитаксиальных структур за счет модификации морфологии границ раздела. Изучены возможности получения островковых пленок железа и эпитаксиальных пленок сплавов Гейслера, проявляющих свойства половинных металлов. Показана возможность создания металлических, в том числе, гетероэпитаксиальных металлических наноструктур с баллистическим электронным транспортом. Также в диссертации предложены направления и конкретные устройства для практического применения полученных объектов и изученных явлений в микро- и наноэлектронике, фотонике и спинтронике.

Диссертационная работа Маликова И.В. состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы из 412 наименований, насчитывает 358 страниц текста.

Во **введении** автором обосновывается актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее цели, обсуждается научная новизна и практическая значимость выполненной работы. Представлен авторский список публикаций по материалам диссертации.

В **первой главе** приведен литературный обзор, в котором кратко, но достаточно емко, описаны особенности роста эпитаксиальных пленок, в частности, с применением импульсного лазерного осаждения. Отражены основные проблемы, определяющие сложность масштабирования указанной технологии. Описаны размерные эффекты проводимости тонких пленок, баллистический транспорт, в том числе, баллистические ферромагнитные наноконтакты. Рассмотрены понятия анизотропного и туннельного магнитосопротивления. Дан краткий обзор публикаций по исследованию особенностей эпитаксиального роста и электронной проводимости пленок тугоплавких (Mo, Nb, W), ферромагнитных (Ni, Fe) металлов. Приведен краткий обзор по получению эпитаксиальных пленок Fe_3O_4 и полных сплавов Гейслера. Введены основные понятия для диодных структур металл-диэлектрик-металл как детекторов ИК и видимого излучения (с NiO в качестве диэлектрика).

Во **второй главе** подробно рассмотрены методики выращивания методом импульсного лазерного осаждения в сверхвысоком вакууме эпитаксиальных тонких одинарных и гетероэпитаксиальных металлических пленок тугоплавких, ферромагнитных и половинных металлов, включая реактивное осаждение в атмосфере кислорода, а также изготовления наноструктур на основе этих пленок. Описаны перспективы использования АСМ-литографии при создании пленок большей толщины в сравнении с традиционной АСМ-литографией.

Третья глава посвящена исследованию основных ростовых закономерностей при создании эпитаксиальных пленок тугоплавких металлов методом импульсного лазерного осаждения на подложках из сапфира.

Рассмотрена зависимость проводящих свойств полученных двух- и трехслойных пленок на основе тугоплавких металлов Nb и Mo как от характера поверхности, так и от особенностей промежуточных границ. Рассмотрена проводимость баллистических металлических наноструктур на основе высококачественных пленок тугоплавких металлов Mo и Nb, а также температурные эффекты при баллистическом переносе электронов в многотерминальных эпитаксиальных вольфрамовых наноструктурах на подложках MgO/GaAs (001).

Четвертая глава диссертационной работы Маликова И.В. посвящена получению и исследованию ферромагнитных эпитаксиальных пленок на основе железа и никеля на подложках сапфира различной ориентации. Показана связь морфологии, магнитополевых и электронно-транспортных характеристик в эпитаксиальных пленках железа. Обсуждаются условия формирования островковых пленок железа и степень их отклонения от равновесных. Установлено наличие гигантского магниторезистивного эффекта в баллистических наноструктурах из Ni и обменного сдвига в плёночных структурах NiO/Ni. Рассмотрены туннельные структуры Ni/NiO/Fe, а также перемагничивание микроструктур под действием спин-поляризованного тока.

В пятой главе приводятся результаты основных ростовых закономерностей структур на основе половинных металлов. Изучены пленки Fe₃O₄ на подложках сапфира различной ориентации и сплавы Гейслера на основе соединений Co₂FeSi, Co₂FeAl и Fe₂CoAl. Установлены корреляционные связи между условиями получения и магнитосопротивлением пленок.

В заключении перечислены основные результаты проведенных исследований, **научная новизна и значимость** которых не вызывают сомнений.

Автореферат диссертационной работы в полной мере отражает ее содержание. Диссертационная работа написана грамотным научным языком, обстоятельно и доступно, что позволяет получить достаточно полное представление о проделанной работе и полученных результатах. Тем не менее можно выделить ряд замечаний и рекомендаций:

1. В первом научном положении автор упоминает малую шероховатость пленки – 0,2 -0,4 нм, то есть 2-4 ангстрема или несколько атомов, однако, не использует термин «атомарная шероховатость», не ясно, почему?

2. На с.85 автор упоминает возможное взаимодействие Fe_3O_4 с подложкой MgO при повышенных температурах, непонятно, о каких температурах идет речь, и как контролировался данный процесс, безусловно, способный оказать самое радикальное влияние на контакт двух фаз, а, следовательно, и на свойства полученной структуры.

3. В ряде случаев автором допущено не вполне корректное употребление обозначений используемых величин. Так, в ряде случаев используется шкала Кельвина, а в ряде - градусы Цельсия. В одной и той же подписи к рисунку употребляются микрометры и нанометры (с.96); значения концентрации КОН выражены в процентах, но непонятно, речь идет о массовых процентах, объемных или мольных (с. 101). Автор допускает использование оценочных суждений, таких как «хороший электрический контакт», явно подразумевающих более четкую численную характеристику. При описании технологии получения некоторые операции описаны с избыточным количеством подробностей, но для других не приведены конкретные условия (температуры, давления), что не позволяет в полной мере проверить полученные результаты в другой лаборатории.

Приведенные замечания не затрагивают основных результатов и не снижают значимость проведенного исследования.

Диссертационная работа Маликова И.В. «Эпитаксиальные пленки тугоплавких, ферромагнитных и половинных металлов: получение, свойства и структуры на их основе» является законченным научно-исследовательским трудом, выполненным автором на высоком научном уровне. Положения, выносимые на защиту, представляют собой оригинальный научный результат, который является решением актуальной научной проблемы.

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют специальности 2.2.2 - Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств. Основные положения доложены и

обсуждены на международных и всероссийских конференциях. Результаты проведенных исследований опубликованы в 38 работах в изданиях, входящих в перечень ВАК и индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science, 1 патенте на изобретение.

Диссертационная работа «Эпитаксиальные пленки тугоплавких, ферромагнитных и половинных металлов: получение, свойства и структуры на их основе» Маликова Ильи Валентиновича соответствует критериям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ №842 от 24 сентября 2013 г. а ее автор – Маликов Илья Валентинович – заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 2.2.2 Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств.

Даю согласие на обработку своих персональных данных.

Официальный оппонент –
доктор физико-математических наук
(1.3.8 – физика конденсированного состояния)
Научно-исследовательский
институт физики ФГАОУ ВО
«Южный федеральный университет»,
директор НИИ физики



Вербенко Илья Александрович

«05» ____ 09 ____ 2024 г.

НИИ физики ФГАОУВО «Южный федеральный университет» 344090, г.
Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194, тел.: +78632433676, факс: +78632434044,
ilich001@ya.ru, <https://ip.sfedu.ru>



Вербенко И.А.
Секретарь Совета
Южного университета
Мирошниченко О.С.