

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию **Маликова Ильи Валентиновича** «**Эпитаксиальные пленки тугоплавких, ферромагнитных и половинных металлов: получение, свойства и структуры на их основе**», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 2.2.2 – электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.

Достигнутый уровень развития микро- и нанoeлектроники, спинтроники, фотоники и других вновь формируемых направлений обусловили рост потребностей в формировании принципиально новой элементной базы на основе материалов, исключающих физические ограничения эксплуатационных и функциональных свойств. В течение последних десятилетий оказались востребованными метаматериалы, мультиферроики, топологические диэлектрики, полуметаллы и металлы, создаваемые по пленочным технологиям. Большие перспективы связываются с многомерностью материалов, физическими принципами характерными для систем электронов при возбуждении, протекании спиновых токов в условиях выполнения закона сохранения топологических зарядов, уникальными возможностями контролируемого управления спин-поляризованными токами на основе прямой и обратной взаимосвязи между электрическими и магнитными полями, в том числе, на границах раздела гетероэпитаксиальных нанопленок из тугоплавких переходных металлов, их оксидов, полуметаллических сплавов Гейслера, электронные транспортные явления, в которых протекают вплоть до сверхвысоких частот. В этой связи формирование высококачественных эпитаксиальных пленок тугоплавких (Mo, Nb, W), ферромагнитных (Ni, Fe) и спиновых полуметаллов (Fe_3O_4 и сплавов Гейслера) с характерными размерами (D) меньшими длины

свободного пробега электронов (Leff) с комплексным анализом транспортных свойств соотносятся к актуальным научным и практически значимым работам.

В обобщенном виде в диссертационной работе Маликова Ильи Валентиновича цель, решаемые задачи и полученные результаты, посвящены всестороннему изучению баллистического механизма токопрохождения в крестообразных гетероэпитаксиальных нанопленочных структурах, создаваемых из указанных соединений на подложках из монокристаллического сапфира с А- и R- ориентациями, возникновение которого наблюдалось при выполнении условия $Leff > D$. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списков сокращений и условных обозначений и цитируемой литературы, изложена на 358 страницах, имеет 168 рисунков, 8 таблиц и 412 литературных ссылок. Материалы диссертационной работы опубликованы в 37 статьях в реферируемых журналах и в виде одной главы в коллективной монографии. Результаты работы защищены патентом РФ и представлялись более, чем на 30 российских и международных научных конференциях.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, научная новизна, положения, выносимые на защиту, обоснованы научное и практическое значение, достоверность положений и выводы диссертации.

В **первой главе** дан краткий обзор особенностей эпитаксиального роста методом импульсного лазерного осаждения (ИЛО). Проведен аналитический обзор публикаций, посвященных исследованиям эпитаксиального роста и электронного и баллистического транспорта в пленках из вышеуказанных металлов, соединений и сплавов, размерных эффектов проводимости в тонких и двухслойных пленках, на ферромагнитных наноконтактах. Даны понятия анизотропного и туннельного магнитосопротивления применительно к полуметаллам и эпитаксиальным пленкам; описания конструкции диодных структур типа МДМ (с NiO в

качестве диэлектрика) для детектирования и излучения в видимом и ИК диапазонах.

Во **второй главе** представлено детальное описание методик нанесения тонких одинарных эпитаксиальных и гетероэпитаксиальных металлических пленок тугоплавких, ферромагнитных и полуметаллов методом ИЛО в сверхвысоком вакууме, формирования наноструктур на их основе, в том числе, при реактивном осаждении в атмосфере кислорода. Описан метод АСМ литографии изготовления проводящим кантилевером на поверхности пленок Nb масок для электрохимического травления и формирования структур из пленок металлов большей толщины, охарактеризованы примененные аналитические методы исследований пленок.

В **третьей главе** представлены оригинальные результаты по исследованиям основных ростовых закономерностей поверхностного и объемного структурирования эпитаксиальных нанопленок (ЭНП) из Mo и Nb, получаемых методом ИЛО на подложках из монокристаллического сапфира Al_2O_3 (-1012) с максимально большими $Leff$, учитывающего влияние внутренней границы раздела (в двухслойных пленках) и толщины промежуточного слоя (в трехслойных пленках) на их продольную проводимость. Изучены проводимость металлических наноструктур на основе Mo и Nb, ее температурные зависимости, в том числе, на многотерминальных эпитаксиальных W наноструктурах на подложках MgO/GaAs (001), свидетельствующие о баллистическом переносе электронов.

В результате исследований морфологии поверхности и объемной структуры, магнитолевых и электронно-транспортных характеристик эпитаксиальных тонких пленок ферромагнитных металлов Ni и Fe, полученных методом ИЛО на подложках сапфира с А- и R- ориентациями (**четвертая глава**) были достигнуты наибольшие $Leff$. Определены условия формирования островковых пленок Fe из большеразмерных зерен с учетом влияния шероховатости. Установлено возникновение как гигантского

магниторезистивного эффекта в баллистических наноструктурах из Ni, так и обменного сдвига в ЭНП из NiO/Ni. Изучены процессы микроструктурного перемангничивания обусловленные протеканием спин-поляризованного тока, а также туннельные структуры на основе ЭНП Ni/NiO/Fe.

Пятая глава посвящена исследованиям ЭНП из магнетита на сапфире с C- и R- ориентациями на буферном подслое из MgO, позволившие установить основные закономерности роста и режимы устойчивого роста с образованием плато в зависимости удельного сопротивления от давления кислорода и температуры, включая окрестность вервеевского фазового перехода. Здесь же описаны результаты исследований ЭНП, осажденных на сапфире с A- и R- ориентацией из сплавов Гейслера (Co_2FeSi , Co_2FeAl , Fe_2CoAl , Co_3Si и Co_2NiSi). Изучено влияние условий роста таких ЭНП на их магнитосопротивление, определены условия возникновения инверсного магнитосопротивления и одноосной магнитной анизотропии.

В заключении сформулированы основные выводы по диссертационной работе.

На защиту автор выносит девять основных научных положений, сформулированных по результатам диссертационной работы, из которых можно отметить:

- установление закономерностей получения методом ИЛО монокристаллических металлических ЭНП из тугоплавких металлов Mo и Nb из ферромагнитных Ni и Fe, обладающих рекордно большими остаточными L_{eff} ; а также островковых пленок Fe с контролируемой структурой;

- обнаружение баллистических эффектов в наноструктурах на основе ЭНП из Mo и Nb и из W на подложках GaAs при комнатной температуре;

- выявление нелокальных эффектов в ЭПН ферромагнитных металлов, в виде перемангничивания спин-поляризованным током, возникновения гигантского магниторезистивного эффекта в крестообразных гетероэпитаксиальных нанопленочных крестообразных структурах и

знакопеременности дифференциального сопротивления в зависимости от тока и толщины NiO в структуре Ni/NiO/Fe.

В диссертационной работе Маликова И.В. представлены 9 позиций **научной новизны**, из них, на мой взгляд, особого внимания заслуживают:

- установление многочисленных научно-обоснованных закономерностей роста ЭПН методом ИЛО из Mo и Nb на сапфире и из W на подложках GaAs, обладающих значительными баллистическими эффектами даже при комнатной температуре, подтвержденные модельными расчетами;

- для железосодержащих микроструктур в ЭПН, сформированных методом ИЛО, были впервые определены критерии однодоменного магнитного упорядочения и условия перемагничивания спин-поляризованным током и найдена корреляционная зависимость магнитных и транспортных свойств;

- в ферромагнитных баллистических крестообразных структурах впервые наблюдался гигантский изгибный магниторезистивный эффект;

- впервые на крестообразных структурах ЭПН из Ni/NiO/Fe получена знакопеременная зависимость дифференциального сопротивления от тока;

- впервые для ЭПН из сплавов Гейслера Co_2FeSi , Co_2FeAl , Co_3Si найдены условия получения одноосной магнитной анизотропии и получена инверсия магнитосопротивления необходимая для создания спиновых инжекторов и детекторов.

Практическая ценность представленной диссертационной работы Маликова И.В. состоит в контролируемом получении методом ИЛО эпитаксиальных и гетероэпитаксиальных пленочных структур с аномально большими остаточными длинами свободного пробега электронов, превышающими на порядок базовые размеры элементов, в остро востребованных в микро- и нанoeлектронике, спинтронике, фотонике, и других бурно развивающихся и формируемых направлениях. Создание металлических, в том числе гетероэпитаксиальных металлических,

наноструктур с баллистическим электронным транспортом, перспективно для создания нового класса электронных устройств, с новым технологическим критерием управления проводимостью. Ячейка магнитной памяти с произвольным доступом, где для переключения состояний используется спин-поляризованный ток защищена патентом РФ.

Диссертационная работа Маликова И.В. на соискание ученой степени доктора физико-математических наук является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение целого ряда научных задач, имеющих важное значение для развития фундаментальных основ эпитаксиального роста пленок и их применения, важных для соответствующих разделов микро- и нанoeлектроники.

Автореферат диссертации хорошо отражает ее содержание. Текст диссертации написан доступным для понимания научным языком. Материалы диссертации изложены логично и корректно, обладают внутренним единством. Достоверность результатов работы не вызывает сомнений и подтверждается их воспроизводимостью при выполнении экспериментов, проведением исследований на современном оборудовании, функционирование которого основано на различных физических принципах, взаимодополняющих друг друга, применением проверенных, признанных мировым научным сообществом, методик исследования и диагностики материалов. Результаты работы, научные новизна, защищаемые положения, выносимые на защиту, аргументированы и всесторонне научно обоснованы автором, сопоставимы с известными литературными данными, свидетельством чего является представленный в диссертационной работе библиографический список, включающий 412 наименований.

В диссертационной работе Маликова И.В. получен ряд новых результатов, которые могут представлять значительный интерес для специалистов и организаций, деятельность которых связана с изучением и разработкой новых материалов, элементов и устройств в микро и нанoeлектронике. Установленные закономерности по контролируемому

созданию эпитаксиальных пленок тугоплавких, ферромагнитных металлов и спиновых полуметаллов могут быть транслированы на традиционно используемые в микроэлектронике подложки Si, GaAs с буферными слоями, а комбинирование рассмотренных пленочных материалов перспективно применительно к эпитаксиальным метаматериалам и структурам, к примеру, для фотоники.

Вместе с тем по сути представленной диссертационной работы следует высказать следующие пожелания и замечания.

Замечания формального типа:

- к сожалению, смысловые аббревиатуры в диссертационной работе и особенно в автореферате не полностью раскрыты в списке сокращений и обозначений;
- текст диссертации и автореферата имеет ряд непринципиальных опечаток и ошибок, к примеру, «...направление [1-11] Mo (Fe)...» (стр. 304), а также ряд жаргонных формулировок типа «Сопротивления креста и мостика на квадрат...», «...соотношение экспериментально найденных изгибного сопротивления креста к сопротивлению на квадрат мостика (R_b/R)».

Основные замечания

1. Является спорным вывод об устойчивости к окислению на воздухе 2 нм нанопленки Mo. В тексте диссертации отмечено, что за 100 дней сопротивление выросло в 1.5 раза.
2. На изображении поперечного сечения ЭПН из Mo на R-плоскости сапфира (рис. 3.7) в ПЭМ с высоким разрешением не указан масштаб и нет его краев. Учитывая важность в работе измерений толщин ЭП, этот результат дал бы наиболее точный ее размер.
3. В подобных измерениях (рис. 3.26) с атомарным разрешением «...трехслойной пленки Mo-Nb-Mo с промежуточным слоем ниобия в два монослоя» следовало бы отмеченные слои для наглядности указать с

соответствующими решеточными размерами.

4. Логично было бы добавить исследование превращений, которые претерпевает упорядоченная структура типа $L2_1$ при исчезновении инверсии магнитосопротивления с отжигом при высоких температурах.

5. Следовало бы по рентгеновским дифрактограммам рассчитать микродеформации, величину и знаки деформаций в ЭПН, что существенно бы доказало сделанные в работе выводы.

6. На мой взгляд, некоторые формулировки научной новизны и защищаемых положений весьма тяжеловесны для понимания их сути.

Несмотря на сделанные замечания, диссертационная работа Маликова И.В. на тему «Эпитаксиальные пленки тугоплавких, ферромагнитных и половинных металлов: получение, свойства и структуры на их основе» вполне заслуживает высокой оценки по всем критериям, включая актуальность выбранной темы, объем и уровень проведенных исследований, глубина анализа и полнота интерпретации результатов, их научная новизна и практическая ценность, диссертационная работа является законченной научно-исследовательской работой.

Поставленные цели и задачи решены на высоком научном уровне, а полученные результаты являются новыми и представляют интерес как в научном, так и в практическом плане. Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы не вызывает сомнений и определяется использованием комплекса современных экспериментальных методов и согласованием результатов анализа образцов, полученных различными независимыми методами исследований. Ряд обнаруженных эффектов наблюдался впервые. Все представленные результаты исследований опубликованы в реферируемых журналах и прошли апробацию на высокоуровневых международных и отечественных конференциях. Диссертационная работа и автореферат на тему «Эпитаксиальные пленки тугоплавких, ферромагнитных и половинных металлов: получение, свойства

и структуры на их основе», соответствует специальности 2.2.2 – «Элементная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств» и критериям, установленным Положением о присуждении учёных степеней, утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 года, а её автор, Маликов Илья Валентинович, безусловно, заслуживает присвоения искомой ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 2.2.2 - электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.



Согласен на обработку персональных данных:

Кузьменко Александр Павлович

Контактные данные:

Адрес места работы:

Подпись Кузьменко А.П. заверяю: