

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

Актуальность темы диссертации. Современные технологии получения и исследования тонких и сверхтонких пленок, многослойных и слоистых материалов привели к созданию пленочных структур и метаматериалов с новыми физическими и квантовыми эффектами. Важным открытием стали двумерные материалы, такие как графен и его производные, а также различные гетероструктуры на их основе, экспериментально демонстрирующие многочисленные интересные физические явления. Спинтроника - относительно новое и перспективное направление электроники, требующее создание и исследование тонкопленочных структур с различными свойствами. Эти структуры могут использоваться для создания активных электронных элементов, включая новую энергонезависимую память, магнитные датчики, а также функциональные элементы микроволновой и терагерцовой электроники.

Однако существуют проблемы, связанные с созданием пленок, обладающих большими длинами свободного пробега электронов. Влияние различных факторов, таких как дефекты подложки и процесс релаксации возникающих напряжений, усложняет предсказание свойств и структуры пленок. Диссертационное исследование И.В. Маликова направлено на выращивание и исследование высококачественных эпитаксиальных пленок тугоплавких, ферромагнитных и половинных металлов для возможного применения в микро- и нанoeлектронике, фотонике, микросистемной технике и других областях. **Таким образом, актуальность темы докторской диссертации И.В. Маликова не вызывает сомнений.**

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения.

Во *введении* приведено обоснование актуальности темы исследования, перечислены решаемые задачи, описаны научная новизна и практическая значимость выполненных исследований, а также сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава содержит обзор литературы по теме диссертации. Приводится изложение особенностей эпитаксиального роста и электронной проводимости пленок тугоплавких и ферромагнитных металлов.

Вторая глава посвящена описанию методик выращивания эпитаксиальных тонких пленок тугоплавких металлов, изготовления наноструктур на их основе, а также используемых методов исследования структуры объема и поверхности пленок и проводящих свойств металлических пленочных структур. Приводится подробное описание используемой для нанесения металлических пленок установки, а также методов контроля получаемых характеристик.

В *третьей главе* описываются результаты по оптимизации метода импульсного лазерного осаждения для получения на подложках из монокристаллического сапфира Al_2O_3 эпитаксиальных тонких пленок молибдена и ниобия в сверхвысоком вакууме. Также подробно обсуждается оптимизация экспериментального исследования объемной и поверхностной структуры пленок тугоплавких металлов молибдена и ниобия, гетероэпитаксиальных двух- и трехслойных пленок этих металлов, их связь с электронными

транспортными свойствами слоев для оптимизации процесса роста пленок, имеющих большие длины свободного пробега электронов, в том числе превышающие толщину пленок. Приведены результаты измерения удельного коэффициента RRR и удельного сопротивления пленок от толщины, сделаны выводы о влиянии скорости роста. Показано влияние скорости роста эпитаксиальных пленок Nb на R-плоскости сапфира на длину свободного пробега электронов.

В *четвертой главе* исследуется использование метода импульсного лазерного осаждения для получения эпитаксиальных ферромагнитных пленок Ni и Fe на подложках из монокристаллического сапфира R-, A- и C-ориентаций. Приведены результаты экспериментального исследования объемной и поверхностной структуры таких пленок для оптимизации процесса роста пленок, имеющих большие длины свободного пробега электронов, в том числе превышающие толщину пленок. Приведены температурные измерения сопротивления пленок, эффективной остаточной длины свободного пробега электронов, эффективной предперколяционной толщины пленок. Также для характеристики качества пленок измерялся параметр RRR, чувствительный к дефектам кристалла всех типов. Показано проявление баллистических эффектов в электронном транспорте эпитаксиальных крестообразных наноструктур из Mo, Mo-Nb, в которых при понижении температуры изгибное сопротивление меняет знак.

В *пятой главе* приводятся результаты по экспериментальному исследованию параметров роста эпитаксиальных пленок половинных металлов на примере оксида железа Fe₃O₄ и пленок кобальтсодержащих сплавов Гейслера. Показано, что чем выше давление кислорода, в атмосфере которого происходит распыление железа, при росте пленок, тем выше температура начала увеличения их удельного сопротивления и наоборот. Приведены результаты температурного исследования значения коэрцитивного поля, θ - 2θ скан пленки. Для пленок сплавов Гейслера на A-плоскости сапфира продемонстрировано получение одноосной магнитной анизотропии в плоскости пленки.

Из вышеперечисленного следует, что полученные в ходе диссертационного исследования результаты обладают новизной.

Достоверность основных полученных результатов и выводов не вызывает сомнений. В работе применяются современные экспериментальные методы, такие как электронная микроскопия, рентгеноструктурный анализ, электронно- и магнитотранспортные измерения, подтверждающие характеристики исследуемых структур.

Работа безусловно обладает научной и практической значимостью. Полученные результаты интересны с точки зрения фундаментальной физики, а также имеют высокий потенциал применения в разработке спинтронных устройств.

Диссертационная работа И.В. Маликова написана грамотно, простым языком и представляет собой серьезное академическое исследование. Общее впечатление о работе положительное. Тем не менее, по работе имеются следующие замечания:

1) В диссертации не приведено подробного анализа причин обнаружения N-образной вольт-амперной характеристики структуры Ni/NiO/Fe с отрицательным дифференциальным сопротивлением (рис.4.46). Какова может быть математическая модель такого нелинейного элемента? Аппроксимация экспериментальной кривой дается приближенной формулой 4.7 без теоретического вывода. Результат является очень интересным и имеет перспективы практического внедрения.

2) В разделе 4.5 написано о проведенных микромагнитных расчетах и хорошем совпадении полученных результатов с экспериментальными, однако параметров микромагнитного моделирования для верификации результатов в диссертации не приведено.

3) В диссертации присутствуют орфографические, грамматические и пунктуационные ошибки, например, на стр.2,8,11,13,14,15,23,26,27,28,48 и др.

Перечисленные замечания не умаляют научную значимость и высокую оценку диссертационной работы.

Заключение

Считаю, что диссертационная работа Маликова Ильи Валентиновича «Эпитаксиальные пленки тугоплавких, ферромагнитных и половинных металлов: получение, свойства и структуры на их основе» соответствует критериям и требованиям положения ВАК РФ «О порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 года, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а ее автор, Маликов Илья Валентинович, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук.

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук, доцент,
заместитель директора по научной работе,
ведущий научный сотрудник, руководитель
лаборатории Антиферромагнитная
спинтроника Федерального государственного
бюджетного учреждения науки «Института
радиотехники и электроники им. В.А.
Котельникова Российской академии наук»



Сафин Ансар Ризаевич

Адрес места работы:
125009, г. Москва, ул. Моховая, 11, стр.7

Контактные данные:
Тел.: +79060656045
E-mail: arsaфин@gmail.com

«11» сентября 2024 г.

