

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.074.04 НА БАЗЕ
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Иркутский государственный университет»
Министерства образования и науки Российской Федерации
по диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета
от «18» октября 2017 г. № 3

О присуждении Кузьминой Алине Сергеевне, гражданке РФ, учёной степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Структура и физические свойства тонкоплёночных разбавленных магнитных полупроводников на основе оксида цинка, полученных методом импульсного лазерного осаждения» по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния принята к защите 30 июня 2017 г., протокол № 2, диссертационным советом Д 212.074.04 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский государственный университет» Министерства образования и науки Российской Федерации (664003, г. Иркутск, бульвар Гагарина, д. 20, приказ Рособнадзора о создании диссертационного совета № 1634–894 от 13.07.2007 г.).

Соискатель, Кузьмина Алина Сергеевна, 1990 года рождения. В 2012 году окончила с отличием специалитет Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Иркутский государственный технический университет» по специальности «Наноматериалы». В 2015 году окончила с отличием магистратуру Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» по направлению «Металлургия». В 2017 году окончила обучение в очной аспирантуре Федерального государственного

бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики. Сдала кандидатские экзамены по этой специальности. Дополнительно сдала кандидатский экзамен по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский государственный университет». Работает инженером отдела лазерной физики и нанотехнологий в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет».

Диссертация выполнена на кафедре квантовой физики и нанотехнологий Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет».

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук, Шнейдер Александр Георгиевич, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», отдел синтеза наноструктур, начальник.

Официальные оппоненты:

Балаев Дмитрий Александрович, доктор физико-математических наук, доцент, Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, директор;

Семенов Андрей Леонидович, кандидат физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет», кафедра радиофизики и радиоэлектроники, доцент

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский технологический университет» (МИРЭА), г. Москва в своём положительном заключении, подписанном Бушем Александром Андреевичем, доктором технических наук, профессором, директором НИИ материалов твердотельной электроники МИРЭА, и Каменцевым Константином Евгеньевичем, кандидатом технических наук, начальником отдела НИИ материалов твердотельной электроники МИРЭА, и утверждённом Рагуткиным Александром Викторовичем, кандидатом технических наук, проректором по инновационному развитию МИРЭА, указала, что диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует пункту 9 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г., а её автор, Кузьмина Алина Сергеевна, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Соискатель имеет 51 опубликованную работу, в том числе по теме диссертации 15 работ общим объёмом 3,56 печ. л.: из них 4 статьи в журналах, включённых ВАК РФ в «Перечень ведущих рецензируемых журналов», и 11 в тезисах докладов всероссийских и международных конференций и других изданиях. В работах представлены результаты по исследованию физической природы высокотемпературного ферромагнетизма в тонких плёнках $Zn_{1-x}Co_xO_y$, эффекта отрицательного колоссального магнитосопротивления в тонких плёнках $Zn_{1-x}Mn_xO_y$, а также корреляции структурных, электрических и магнитных характеристик в тонких плёнках $Zn_{1-x}Li_xO_y$. В диссертации не обнаружены недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, авторском вкладе и объёме научных изданий.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Magnetism and magneto-optics features of $Zn_{1-x}Co_xO_y$ thin films grown by pulsed laser deposition / A.S. Kuz'mina, A.A. Lotin, O.A. Novodvorsky, N.S. Perov, E.A. Gan'shina, L.A. Makarova, A.S. Semisalova, A.G. Shneider, M.P. Kuz'min, S.S. Kolesnikov // *Materials chemistry and physics*. – 2017. – Vol. 198. – P. 291–296 (impact factor JCR: 2,084).

2. Giant negative magnetoresistance in manganese-substituted zinc oxide / X.L. Wang, Q. Shao, A.S. Zhuravlyova (Kuz'mina), M. He, Y. Yi, R. Lortz, J.N. Wang, A. Ruotolo // *Scientific reports*. – 2015. – Vol. 5, № 9221. – P. 1–5 (impact factor JCR: 4,259).

3. Журавлёва (Кузьмина) А.С. Корреляция транспортных и магнитных характеристик в тонких плёнках ZnO, легированных Li / А.С. Журавлёва (Кузьмина) // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. – 2015. – № 11 (106). – С. 118–123 (импакт-фактор РИНЦ: 0,241).

4. Журавлёва (Кузьмина) А.С. Структурные особенности тонких плёнок $Li_{0,06}Zn_{0,94}O$, полученных методом импульсного лазерного напыления / А.С. Журавлёва (Кузьмина) // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. – 2014. – № 9 (92). – С. 24–29 (импакт-фактор РИНЦ: 0,241).

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

Официальный оппонент *Балаев Дмитрий Александрович*, доктор физико-математических наук, доцент, Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, директор. Замечания: 1) В главе 3, п.п. 3.4 автор аппроксимирует кривые намагничивания при комнатной температуре и получает значения коэрцитивной силы H_C . Ввиду малости магнитного сигнала значения H_C определены с большой погрешностью и это видно на вставке рис. 3.15 – петли сдвинуты по оси X, что явно является следствием погрешности. Возможно для этого случая и не стоило приводить данные в области малых полей (где относительная погрешность большая), поскольку ясно, что коэрцитивная сила составляет всего десятки Эрстед. 2) Для плёнок $Zn_{1-x}Mn_xO$ автор приводит температурные зависимости намагниченности,

измеренные в режимах охлаждения без внешнего поля и в поле – рис. 4.7. И единственным комментарием к этим данным (совпадение зависимостей $J(T)$ при различных режимах) является «отсутствие суперпарамагнитной и антиферромагнитной фаз в синтезированных плёнках». С этим можно согласиться, но автор не интерпретирует наблюдаемое из данных рис. 4.7 сильное возрастание магнитного момента (намагниченности) в области низких температур (ниже ~ 20 К). 3) Достаточно слабо прокомментирован линейный участок магнитосопротивления плёнок $Zn_{1-x}Mn_xO$ в области сильных магнитных полей. Использование диапазона полей до ~ 13 Т для исследования магнитосопротивления является «украшением» (сильным моментом) диссертации, однако механизм отрицательного линейного магнитосопротивления не ясен. Автор ограничивается фразой, что это «...связано с процессом магнитного рассеяния ионов Mn^{2+} в пара- или антиферромагнитном состоянии». Недочёт: На стр. 5 диссертации (и стр. 3 автореферата) присутствует фраза «...физическая природа возникновения этих параметров...», причём, под «параметрами» понимаются и концентрация носителей, и электросопротивление, и ферромагнитное упорядочение.

Официальный оппонент *Семенов Андрей Леонидович*, кандидат физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет», кафедра радиофизики и радиоэлектроники, доцент. Замечания: 1) Несмотря на то, что на рис. 3.2 представлена зависимость концентрации Co в мишенях и пленках, для лучшего понимания текста диссертации следовало бы включить в таблицы свойств пленок данные о составе мишеней, из которых они были получены; 2) К замечаниям стоит отнести и то, что в различных главах одним и тем же физическим величинам соответствуют единицы измерения из различных систем измерений. Например, намагничивающее поле выражается как в теслах (гл. 3,4), так и в эрстедах (гл. 5); 3) Не совсем корректно строить графические зависимости

электрических и магнитооптических параметров от содержания Co (рис. 3.13 и 3.17), т.к. толщины исследованных пленок тоже варьируются в достаточно большом диапазоне: от 151 до 262 нм. Данные зависимости были бы более достоверными, если бы в дополнение к исследованию по влиянию толщин пленок, легированных Co, на их электрические характеристики было проведено исследование на масс-спектрометре, аналогично пленкам, легированным Li; 4) В пункте 5.2 главы 5 допущена ошибка, связанная скорее всего с рассеянным вниманием в момент написания: перепутаны низкое и высокое давления; $3,15 \cdot 10^{-5}$ Торр описано как самое высокое давление в камере, а $7,5 \cdot 10^{-3}$ Торр – как самое низкое. Предположительно, изначально имелся в виду “высокий” и “низкий” вакуум. Результаты данного исследования интерпретированы исходя из допущенной ошибки. Недочёты: 1) Во втором пункте научной новизны результатов (стр. 7) «Впервые обнаружен и объяснен рост увеличения подвижности электронов...» следует исправить на «Впервые обнаружен и объяснен рост подвижности электронов...»; 2) На рис. 3.13 и в таблице 3.2 есть разночтения значений удельного сопротивления для концентраций Co 10 и 13 ат. %; исходя из текста диссертации следует поменять местами значения ячеек таблицы.

Ведущая организация – *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский технологический университет»*, г. Москва. Замечания: 1) Не объяснено, чем обусловлен выбор неодинакового диапазона концентраций для легирующих элементов: $C(\text{Co}) = 0\text{--}42$ ат. %, $C(\text{Mn}) = 0\text{--}8$ ат. %, $C(\text{Li}) = 0\text{--}6$ ат. %; 2) Не совсем понятно, насколько целесообразным является представление результатов исследования свойств керамических мишеней, если в качестве объекта исследований указаны структура и свойства тонкопленочных РМП на основе оксида цинка; 3) В главе 1 параграфы 1.2 и 1.3 являются информативными и проработанными и могут в дальнейшем быть включены в учебное пособие, однако мало используются в основной части диссертации (главах 3–5); 4) В литературном обзоре автор иногда приводит ссылки на

учебные пособия и публикации в низкорейтинговых русскоязычных изданиях (№ 4, 6, 63, 64, 86, 101).

Отзывы на автореферат:

1. *Банишев Александр Федорович*, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем лазерных и информационных технологий Российской академии наук – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. Замечания: 1) Необходимо в тексте пояснить влияние сапфировых подложек с-ориентации на рост тонких пленок ZnO; 2) На рис. 6 (стр. 13) необходимо сделать «вставки», отражающие зависимости магнитосопротивления пленок при 50 К в расширенном виде.

2. *Егранов Александр Васильевич*, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук. Замечания: 1) Автор использует для обозначения химического состава плёнок не совсем обычное обозначение с «у», например, $Zn_{1-x}Co_xO_y$, при этом «у» никак не прописывается; 2) Рисунок 3 в автореферате состоит из трёх частей, однако, в подписи к рисунку они не прописаны; 3) Из текста автореферата не совсем ясно, какую роль играют междоузельные атомы лития в формировании ферромагнетизма плёнок $Zn_{1-x}Li_xO_y$; 4) Результаты магнитных измерений тонких плёнок (рис. 4 и 8 в автореферате) соискателю следовало представить в едином виде и в одних шкалах измерения.

3. *Мирзаде Фикрет Хансуварович*, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией математического моделирования лазерных процессов Института проблем лазерных и информационных технологий РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. Замечания: В автореферате автор неоднократно (стр. 10, 11, 13) указывает, что синтезированные пленки имеют структуру вюрцита, ориентированную вдоль оси с, однако, не приводит данные РФА.

4. *Номоев Андрей Валерьевич*, доктор физико-математических наук, доцент кафедры общей физики, руководитель лаборатории физики наносистем Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Бурятский государственный университет». Замечаний нет.

5. *Павлов Александр Александрович*, кандидат химических наук, научный сотрудник Института элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова Российской академии наук. Замечаний нет.

6. *Эдельман Ирина Самсоновна*, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Института физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН; *Жарков Сергей Михайлович*, кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник Института физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН. Замечаний нет.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается широкой известностью их достижений в области физики конденсированного состояния, наличием публикаций по данному направлению, а также способностью определить научную и практическую значимость диссертационной работы. Официальный оппонент доктор физико-математических наук, доцент, *Балаев Д.А.* – известный учёный в области исследования свойств магнитоупорядоченных веществ, а также физики магнитных явлений, имеет более 100 научных работ, в том числе в высокорейтинговых российских и зарубежных журналах. Официальный оппонент кандидат физико-математических наук, доцент, *Семенов А.Л.* – высококвалифицированный специалист по изучению физических свойств аморфных и нанокристаллических металлических лент, а также влияния на них различных внешних воздействий (температуры, лазерной и термомагнитной обработки), имеет 52 научные публикации, включая 41 статью в авторитетных

российских и зарубежных изданиях. Ведущая организация – *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский технологический университет»* – научное учреждение, известное в области создания и исследования свойств тонких плёнок и керамических образцов (в том числе на основе оксидов металлов), а доктор технических наук *Буш А.А.* и кандидат технических наук *Каменцев К.Е.* – высококвалифицированные учёные в области полупроводникового материаловедения для целей твердотельной микро- и наноэлектроники.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований: *разработана* экспериментальная методика получения стабильной во времени дырочной проводимости в тонких плёнках $Zn_{1-x}Li_xO_y$ ($x = 0-0,06$), заключающаяся сначала в их кратковременном послеростовом отжиге в потоке аргона, затем в потоке кислорода с промежуточной закалкой в деионизированной воде; *предложен* оригинальный комплексный подход к исследованию физических свойств тонкоплёночных разбавленных магнитных полупроводников на основе ZnO; *доказана* перспективность использования комплексного подхода исследования свойств тонких плёнок для понимания физической природы наблюдаемых в них явлений и эффектов в зависимости от условий импульсного лазерного осаждения и внешних воздействий, и, как следствие, развития спиновой электроники.

Теоретическая значимость исследования обусловлена доказательством того, что высокотемпературный ферромагнетизм в синтезированных тонких плёнках $Zn_{1-x}Co_xO_y$ ($x = 0,13-0,42$), $Zn_{1-x}Mn_xO_y$ ($x = 0-0,08$), $Zn_{1-x}Li_xO_y$ ($x = 0,02-0,06$) имеет различную природу и усиливается с ростом количества кластеров металлического кобальта, Mn–V_O–Mn поляронов и дефектов внедрения Li; *применительно к проблематике диссертации результативно использованы* усовершенствованный метод импульсного лазерного осаждения тонких плёнок, исключающий попадание микрокапель на их поверхность, а также современные экспериментальные методики лабораторных исследований;

изложены аргументы, касающиеся причин возникновения низкотемпературного эффекта отрицательного колоссального магнитосопротивления в тонких плёнках $Zn_{1-x}Mn_xO_y$ ($x = 0,02-0,08$), который усиливается при увеличении атомной концентрации марганца и снижении температуры от 50 до 1,4 К; *раскрыты* особенности зависимостей концентрации и подвижности электронов от содержания кобальта в тонких плёнках $Zn_{1-x}Co_xO_y$ ($x = 0-0,42$); *изучена* корреляция особенностей электрических, магнитных, магнитотранспортных и магнитооптических свойств тонких плёнок на основе ZnO, а также факторы, влияющие на их появление (концентрация легирующей примеси, концентрация кислородных вакансий).

Значения полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что: *разработана* методика получения тонких плёнок $Zn_{1-x}Li_xO_y$ *p*-типа, которая может быть применена для синтеза других тонкоплёночных разбавленных магнитных полупроводников с дырочной проводимостью; *определены* перспективы практического использования полученных методом импульсного лазерного осаждения тонкоплёночных разбавленных магнитных полупроводников на основе ZnO со стабильными характеристиками для создания новых энергоэффективных и быстродействующих устройств полупроводниковой спинтроники; *созданы* высококачественные тонкие плёнки $Zn_{1-x}Co_xO_y$ ($x = 0-0,42$), $Zn_{1-x}Mn_xO_y$ ($x = 0-0,08$) и $Zn_{1-x}Li_xO_y$ ($x = 0-0,06$), которые во всём диапазоне x сохраняют кристаллическую структуру вюрцита, ориентированную вдоль направления (001), и обладают низкой шероховатостью поверхностей, что свидетельствует об их перспективности в качестве новых материалов спинтроники; *представлены* рекомендации по использованию результатов исследований в организациях, которые занимаются синтезом оксидных материалов для полупроводниковой индустрии, а также в процессе подготовки студентов.

Оценка достоверности результатов исследования выявила: *для экспериментальных работ* результаты обладают воспроизводимостью и получены с использованием апробированных методов анализа и

современного сертифицированного оборудования; *выводы базируются* на обобщении результатов современных исследований разбавленных магнитных полупроводников на основе ZnO; *использовано* сравнение полученных экспериментальных данных с данными, полученными ранее по рассматриваемой тематике; *установлено* качественное совпадение некоторых результатов структурных, электрических и магнитных свойств тонких плёнок на основе ZnO, представленных в диссертации, с результатами литературных источников; *использованы* современные методики сбора, обработки и визуализации данных.

Личный вклад соискателя состоит в его непосредственном участии в выполнении анализа литературных данных, синтезе керамических мишеней и тонких плёнок на основе ZnO и исследовании их структуры и физических свойств, в обработке, систематизации и интерпретации большинства полученных экспериментальных данных, в подготовке публикаций по выполненной работе, а также в представлении результатов исследований на различных международных и всероссийских научных мероприятиях.

Диссертационный совет пришёл к выводу, что диссертация Кузьминой А.С. является законченным научным исследованием, выполненным по актуальной тематике, результаты которого имеют высокую научную и практическую значимость. Работа соответствует специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния и пункту 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г., а также отвечает требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

На заседании 18 октября 2017 г. диссертационный совет принял решение присудить Кузьминой А.С. учёную степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 19 человек, из них 7 докторов по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния, участвовавших в заседании, из 26 человек,

входящих в совет, проголосовали: за – 19, против – 0, недействительных бюллетеней – нет.

Зам. Председателя
диссертационного совета Д 212.074.04,
доктор физико-математических наук,
профессор



Афанасьев Николай Тихонович

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.074.04,
доктор физико-математических наук,
доцент

Гаврилюк Алексей Александрович

18 октября 2017 г.