

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по инновационному развитию
ФГБОУ ВО «Московский
технологический университет»

Рагуткин Александр Викторович

« 23 » сентября 2017 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Кузьминой Алины Сергеевны
«Структура и физические свойства тонкопленочных разбавленных магнитных
полупроводников на основе оксида цинка, полученных методом импульсного
лазерного осаждения», представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности
01.04.07 – физика конденсированного состояния

Актуальность темы исследования заключается в создании тонкопленочных разбавленных магнитных полупроводников на основе оксида цинка с параметрами, оптимальными для разработки новых энергоэффективных и быстродействующих устройств спинтроники и решения проблем современной микроэлектроники, таких как предел миниатюризации и плотности электронных элементов, высокое энергопотребление и тепловыделение наноструктур. Для создания надежных устройств спиновой электроники необходимы тонкие пленки предельно высокого качества с минимальной шероховатостью поверхности, с достаточной концентрацией носителей заряда, низким удельным сопротивлением, ферромагнитным упорядочением и высоким магнитосопротивлением при комнатной температуре. Диссертационная работа Кузьминой А.С. посвящена разработке таких многофункциональных материалов. В качестве матрицы для тонких пленок автором выбран оксид цинка, который обладает большой энергией связи экситонов, высокой прозрачностью, твердостью, радиационной стойкостью и другими достоинствами. Для синтеза тонких пленок на основе ZnO использован метод импульсного лазерного осаждения, отличающийся универсальностью по отношению к напыляемому материалу, возможностью контроля процессом роста, а также практически исключаящий наличие посторонних примесей.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и одного приложения.

Во введении сформулированы цель и задачи исследования, обоснована актуальность темы, указаны научная новизна и практическая значимость работы, представлены научные положения, выносимые на защиту, а также сведения о личном вкладе автора, методах исследования, степени достоверности и апробации научных результатов.

В первой главе приведен обширный литературный обзор библиографических сведений, касающийся современного состояния исследований свойств тонких пленок на основе оксида цинка. Описаны история становления и перспективы развития спинтроники. Графически показана растущая динамика публикационной активности по теме «тонкие пленки ZnO», начиная с 1997 г., что свидетельствует об актуальности проводимых исследований. Рассмотрены методы получения тонких пленок. Отмечено, что импульсное лазерное осаждение является одним из лучших методов синтеза тонкопленочных материалов. Это утверждение автора подкреплено не только анализом литературных источников, описывающих достоинства и недостатки различных методов, но и дополнительными экспериментами, проводимыми при непосредственном участии автора (ссылки на работы указаны). Наибольший интерес представляет параграф 1.6, в котором проанализирована информация по вопросам изучения высокотемпературного ферромагнетизма, проводимости и отрицательного магнитосопротивления РМП на основе оксида цинка. Следует отметить, что экспериментальные результаты для $Zn_{1-x}Co_xO_y$, $Zn_{1-x}Mn_xO_y$, $Zn_{1-x}Li_xO_y$, опубликованные в работах за последние несколько лет, систематизированы в таблицы 1.1 и 1.2, удобные для читателя. В выводах к первой главе автор обосновывает необходимость проведения дальнейших исследований свойств РМП на основе ZnO.

Вторая глава – методическая. В ней указаны принцип работы и возможности используемых установок для импульсного лазерного осаждения, а также условия синтеза тонких пленок ZnO, легированных кобальтом, марганцем и литием. Следует обратить внимание на параграф 2.2, предоставляющий дополнительную информацию, касающуюся структуры и морфологии сапфировых подложек. Шероховатость всех подложек, используемых для осаждения пленок, составляла около 1 нм. Подробно описан комплекс экспериментального оборудования, позволяющего получать информацию о структуре и свойствах синтезированных тонких пленок.

В третьей главе последовательно представлены результаты исследования структурных, электрических, магнитных и магнитооптических свойств тонких пленок $Zn_{1-x}Co_xO_y$ ($x = 0-0,42$). Определено, что подвижность электронов в пленках $Zn_{1-x}Co_xO_y$ при $x = 0-0,24$ убывает экспоненциально из-за ухудшения кристаллической структуры пленок, затем возрастает за счет восстановления стехиометрии пленок по кислороду. Установлено, что магнитные и магнитооптические свойства тонких пленок $Zn_{1-x}Co_xO_y$ при увеличении концентрации примеси изменяются немонотонно. Обнаружено, что ферромагнетизм в тонких пленках $Zn_{1-x}Co_xO_y$ при комнатной температуре имеет кластерную природу. Одной из особенностей главы является параграф 3.1,

представляющий результаты исследования состава, структуры и морфологии керамических мишеней $ZnO-Co_3O_4$, на основе которых были синтезированы тонкие пленки $Zn_{1-x}Co_xO_y$.

В четвертой главе приведены результаты исследования структурных, электрических, магнитных и магнитотранспортных характеристик тонких пленок $Zn_{1-x}Mn_xO_y$ ($x = 0-0,08$). Установлено, что все синтезированные пленки имеют электронный тип проводимости и являются ферромагнитными при комнатной температуре. Автор предполагает, что в пленках сосуществуют два механизма ферромагнетизма: ферромагнитный обмен между катионами марганца посредством кислородных вакансий и суперобменное взаимодействие между кислородными вакансиями. Важным результатом главы является обнаружение аномального эффекта магнитосопротивления в тонких пленках $Zn_{1-x}Mn_xO_y$. Значения относительного отрицательного магнитосопротивления для тонких пленок $Zn_{0,92}Mn_{0,08}O_y$ достигают 225 % при 1,4 К.

В пятой главе приведены результаты исследования структурных, электрических и магнитных свойств тонких пленок $Zn_{1-x}Li_xO_y$ ($x = 0-0,06$), а также результаты изучения элементного состава по толщине образцов и электронного состояния атомов. Автором обнаружено, что пленки, не подверженные отжигу в потоке кислорода, имеют электронную проводимость, обусловленную эффектом самокомпенсации, а росту концентрации электронов способствует более высокое давление в процессе синтеза (большая нестехиометрия пленок по кислороду). Разработана методика получения дырочной проводимости ($10^{16}-10^{18} \text{ см}^{-3}$) в пленках $Zn_{1-x}Li_xO_y$. Обнаружен слабый высокотемпературный ферромагнетизм $Zn_{1-x}Li_xO_y$, который усиливается с ростом концентрации лития. По мнению автора, особую роль в его возникновении играют междоузельные атомы лития.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы. Список сокращений и условных обозначений оформлен в соответствии с требованиями ГОСТ (столбцом с детальной расшифровкой). Список литературы обширен (238 наименований) и содержит библиографическую информацию по научным публикациям, которые учитывались при проведении диссертационного исследования. Следует отметить большое число современных (с 2000 г.) зарубежных литературных источников по разбавленным магнитным полупроводникам. Приложение графически отражает информацию о перспективах развития спиновой электроники до 2040 г.

Анализ результатов исследования и опубликованных работ автора позволяет сделать вывод, что цель диссертационной работы, касающаяся расширения существующих представлений о структуре и свойствах тонких пленок $Zn_{1-x}Co_xO_y$, $Zn_{1-x}Mn_xO_y$ и $Zn_{1-x}Li_xO_y$, синтезированных методом ИЛО, достигнута.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

– Автором впервые обнаружен и объяснен низкотемпературный эффект отрицательного колоссального магнитосопротивления в тонких пленках ZnO , легированных марганцем (2–8 ат. %). Установлено, что этот аномальный эффект

усиливается при снижении температуры, а также при увеличении концентрации марганца (до 225 % при $T = 1,4$ К).

– Автором впервые обнаружен и объяснен рост подвижности электронов в тонких пленках ZnO, легированных кобальтом (24–42 ат. %).

– Автором впервые разработана методика синтеза легированных литием (0–6 ат. %) тонких пленок ZnO с относительно высокой концентрацией дырок (10^{18} см⁻³), являющейся стабильной во времени;

– Автором впервые обнаружено, что при лазерной абляции эксимерным KrF-лазером на поверхности керамических мишеней ZnO-Co₃O₄ формируются конусообразные структуры и микровискеры, ориентированные к центру мишеней, а также происходит радиальное распределение элементов.

Практическая значимость работы заключается в получении тонкопленочных разбавленных магнитных полупроводников на основе оксида цинка с воспроизводимыми характеристиками, перспективных для расширения элементно-узловой базы полупроводниковой спинтроники. Внедрение метода импульсного лазерного осаждения, используемого автором, в технологию производства устройств спиновой электроники может привести к снижению их стоимости.

Результаты диссертации Кузьминой А.С. имеют существенное значение для развития физики конденсированного состояния и рекомендуются для использования в ООО «Келеген», ООО «Элмос», ООО «Изовак», ООО «Элитех», ИФФТ РАН, ИПЛИТ РАН, ИФ СО РАН, ИФП СО РАН, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, ИСЭ СО РАН, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», СФУ, КФУ, НГУ, НИЯУ МИФИ, РГПУ им. А.И. Герцена, МГУ им. М.В. Ломоносова и других организациях, где синтезируют и исследуют тонкие пленки и гетероструктуры на основе оксидных систем с прогнозируемыми структурными, электрическими, магнитными и магнитооптическими свойствами. Кроме того, результаты исследований рекомендуются в виде лекционных и учебно-методических материалов при изучении курсов «Физика конденсированного состояния» и «Физические основы электроники».

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, представленных в диссертационной работе, не вызывает сомнений и обеспечивается использованием апробированных взаимодополняющих методов анализа и современного сертифицированного оборудования, а также общим согласованием с результатами других исследователей. Анализ экспериментальных данных проведен с соблюдением критериев достоверности физических измерений. Выводы и научные положения диссертации обоснованы и непротиворечивы. Результаты исследования достаточно полно отражены в статьях автора, опубликованных в журналах ВАК РФ, а также прошли широкую апробацию на всероссийских и международных конференциях.

Личный вклад автора заключается в анализе литературных данных, синтезе и исследовании структуры и физических свойств керамических мишеней и тонких пленок на основе ZnO, а также обработке и интерпретации полученных

данных. Автор также принимал активное участие в апробации результатов исследований и написании научных статей, о чем свидетельствуют победы в научных мероприятиях, а также публикации без соавторов.

Диссертация Кузьминой А.С. написана доступным и грамотным языком, хорошо структурирована и оформлена. Несмотря на очевидные достоинства, **диссертационная работа не лишена недостатков:**

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).

Высказанные замечания не снижают общую положительную оценку диссертационной работы Кузьминой А.С., выполненной на высокой экспериментальном уровне и содержащей оригинальные результаты, расширяющие представления о физических свойствах тонкопленочных разбавленных магнитных полупроводников. Полученные научные результаты соответствуют пунктам 1 и 4 Паспорта специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния. Автореферат диссертации Кузьминой А.С. в полной мере отражает содержание диссертационной работы.

Заключение. Диссертация «Структура и физические свойства тонкопленочных разбавленных магнитных полупроводников на основе оксида цинка, полученных методом импульсного лазерного осаждения» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая по актуальности, научной новизне и практической значимости отвечает критериям Положения о присуждении ученых степеней (п. 9 – п. 14), утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор Кузьмина А.С. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Диссертационная работа Кузьминой А.С. представлена и обсуждена на заседании НИИ материалов твердотельной электроники ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» 05 сентября 2017 года, протокол № 4. Отзыв на диссертацию Кузьминой А.С. был утвержден по результатам обсуждения на заседании НИИ материалов твердотельной электроники ФГБОУ ВО «Московский технологический университет», протокол № 5 от 12 сентября 2017 года.

