

Министерство образования и науки  
Донецкой Народной Республики  
Государственное учреждение «Донецкий физико-технический  
институт им. А.А. Галкина»  
Министерство образования и науки  
Луганской Народной Республики  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Луганский национальный университет  
имени Тараса Шевченко»

*На правах рукописи*



**Тихий Александр Александрович**

**ОПТИЧЕСКИЕ И РЕЗИСТИВНЫЕ СВОЙСТВА  
НЕСТЕХИОМЕТРИЧЕСКИХ МАГНИТНЫХ ПЛЕНОК НА ОСНОВЕ  
МАНГАНИТ-ЛАНТАНОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

01.04.07 – физика конденсированного состояния

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Донецк – 2018

Работа выполнена в Государственном учреждении «Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина», г. Донецк и Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования Луганской Народной Республики «Луганский национальный университет имени Тараса Шевченко», г. Луганск.

Научный кандидат физико-математических наук,  
руководитель: доцент, старший научный сотрудник  
**Жихарев Игорь Васильевич**

Официальные Милославский Александр Григорьевич,  
оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор, Государственное образовательное  
учреждение высшего профессионального  
образования «Донецкий национальный  
университет» (ГОУ ВПО ДонНУ), профессор  
кафедры теоретической физики и  
нанотехнологий

**Васильев Сергей Владимирович,**  
кандидат физико-математических наук,  
Государственное учреждение «Донецкий физико-  
технический институт им. А. А. Галкина», старший  
научный сотрудник отдела электронных свойств  
металлов

Ведущая Государственное образовательное  
организация: учреждение высшего профессионального  
образования «Донецкий национальный  
университет»

Защита состоится «20» декабря 2018 года в 14-00 на заседании диссертационного совета Д 01.015.01 при Государственном учреждении «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина» по адресу: Донецк-114, ул. Розы Люксембург, 72, конференц-зал. Тел. факс: 342-90-18, e-mail: t.n.tarasenko@mail.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГУ ДонФТИ им. А.А. Галкина» по адресу: Донецк-114, ул. Розы Люксембург, 72, сайт ДонФТИ: [www.donfti.ru](http://www.donfti.ru).

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ ноября 2018 г.

Учёный секретарь диссертационного  
учёного совета Д 01.015.01

 Т.Н. Тарасенко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Соединения семейства манганитов представляют интерес, как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения. Присущие им свойства колоссального магнитосопротивления, спиновой поляризации носителей заряда, а также многофазная диаграмма делают перспективным применение тонких плёнок манганитов в качестве высокочувствительных датчиков температуры и магнитного поля, как компонентов ячеек памяти и устройств спинтроники [1].

Эпитаксиальные плёнки  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  (LSMO) проявляют максимальный магнито- и терморезистивный эффект при температурах, близких к комнатной, при этом типичные значения проводимости указанных плёнок находится в диапазоне, удобном для практических применений. В то же время поликристаллические плёнки, обладают большей величиной совокупного магниторезистивного эффекта, а также характеризуются дополнительным параметром – размером зерна, оказывающим существенное влияние на их свойства.

Изучение оптических свойств тонких плёнок манганитов позволяет бесконтактно получать информацию как об электронных состояниях последних, так и о геометрических параметрах плёнок.

Среди методов исследования оптических свойств тонких плёнок эллипсометрия отличается широкими возможностями и наибольшей чувствительностью. В частности, она является практически единственным неразрушающим бесконтактным оптическим методом, позволяющим определять толщины пленок менее половины длины волны зондирующего излучения [2]. Однако для эффективного применения эллипсометрии необходимо учитывать специфику исследуемых объектов и способа измерений, что делает актуальной адаптацию приёмов и методов интерпретации результатов эллипсометрических измерений (решения обратной задачи эллипсометрии) к конкретным классам исследуемых покрытий.

### **Степень научной проработанности темы.**

В 1950 г. Йонкер и Ван Сантен при легировании щелочноземельными элементами исходно диэлектрических марганцевых перовскитов  $\text{LaMnO}_3$  обнаружили корреляцию между появлением электропроводности и ферромагнетизма (ФМ).

Первой успешной попыткой объяснить возникновение проводимости и магнитосопротивления в допированных манганитах стала теория двойного обмена Зинера (ДО) [3], которая показала исключительную роль цепочек  $\text{Mn}^{3+} - \text{O}^{2-} - \text{Mn}^{4+}$  в формировании уникальных свойств допированных манганитов. В дальнейшем эта теория была дополнена учётом янтеллеровского (ЯТ) характера иона  $\text{Mn}^{3+}$  и представлениями о носителях заряда как о заряженных магнитоупругих поляронах. Помимо прочего, на основании этих представлений описана зонная структура и спектры оптической проводимости манганитов [4].

Масштабные исследования тонких плёнок манганитов в конце прошлого, начале нынешнего века показали существенные отличия их свойств от свойств массивных образцов. Причём, эти отличия тесно связаны как с материалом подложки, так и с технологией получения. Таким образом, имеется большое многообразие сочетаний материалов и технологий, интересных для изучения.

Эллипсометрический метод исследования тонкоплёночных покрытий известен с начала прошлого века, однако его распространение долгое время было ограничено большим количеством рутинных вычислений, необходимых для интерпретации результатов измерений. На сегодняшний день разработано немало методов решения обратной задачи эллипсометрии. Тем не менее, большинство из них применимы лишь к какому-либо одному кругу объектов, а для наиболее универсальных – оптимизационных методов, всё ещё сохраняется проблема локальных минимумов [2].

**Степень разработанности темы исследования.** Тема диссертационной работы соответствует основным научным направлениям ГУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина». Основу диссертации составляют результаты, полученные при выполнении государственной бюджетной темы филиала Донецкого физико-технического института им. А.А. Галкина НАН Украины при Луганском национальном университете имени Тараса Шевченко «Исследование формирования и свойств наноструктурных материалов» 2003 – 2006 г.г., № госрегистрации 0103V003614.

**Цель и задачи исследования.** Настоящая работа ставит своей целью создание специальных приёмов в оптических исследованиях тонкоплёночных покрытий, а также применение этих методов к изучению свойств LSMO плёнок, полученных методом dc-магнетронного распыления мишени состава  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  в атмосфере аргон-кислород.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

1. Совершенствование методов решения обратной задачи эллипсометрии (ОЗЭ) в сочетании со спектрофотометрией, предназначенных для изучения оптических свойств однослойных поглощающих плёнок.
2. Совершенствование методов решения ОЗЭ, предназначенных для изучения оптических свойств многослойных структур.
3. Использование предложенных приёмов для изучения оптических, резистивных и магниторезистивных свойств эпитаксиальных и поликристаллических LSMO плёнок в зависимости от их толщины и термообработки.
4. Создание комплексной методики контроля качества наноразмерных LSMO плёнок оптическими методами.

**Предметом** исследования являются оптические, резистивные, магниторезистивные, и структурные свойства наноразмерных LSMO пленок и применение оптических методов к их изучению.

**Объектом** исследования являются наноразмерные LSMO пленки, полученные на подложках  $\text{SrTiO}_3$  (110),  $\text{NdGaO}_3$  (001),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (012) и  $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$  (111) методом dc-магнетронного распыления мишени состава  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  в атмосфере аргон-кислород.

**Методами** многоугловой отражательной эллипсометрии и спектрофотометрии в соответствии с предложенными моделями и расчётными алгоритмами определялись толщины пленок и также спектральные зависимости оптической проводимости (спектральные зависимости показателя преломления и коэффициента экстинкции).

Магниторезистивные измерения на постоянном токе, проведенные стандартным четырехзондовым методом, позволили получить температурные зависимости сопротивления магниторезистивного эффекта.

Дифференциальный динамический метод измерения магнитной восприимчивости использовался для измерения температурных зависимостей относительной намагниченности.

Рентгеноструктурный анализ использовался для контроля ориентации подложек, а также состава мишеней и плёнок.

#### **Научная новизна:**

- Экспериментально установлена и объяснена монотонно возрастающая зависимость показателя преломления  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_{3-\alpha}$  от дефицита кислорода  $\alpha$ . Предложенный метод расчёта показателя преломления составов  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_{3-\alpha}$  применим для всей области существования ферромагнитной фазы.
- Установлено, что величина оптической проводимости ( $\sigma_{\text{opt}}$ ) при энергии кванта излучения 2 эВ является предельно достижимой для минимальной величины dc-проводимости при температуре перехода «металл-полупроводник» ( $\sigma_{\text{dc}}(T_{\text{MI}})$ ) в бездефицитной по кислороду эпитаксиальной пленке, которая определяется плотностью носителей зарядов.
- Для анализа результатов эллипсометрических измерений наноразмерных LSMO плёнок предложена модифицированная версия метода Малина-Ведама, которая позволяет определять характеристики плёнки с высокой степенью точности и учитывать сложную структуру границ.
- Разработан оптимизационный алгоритм решения ОЗЭ с использованием целевой функции, включающей результаты измерений оптического пропускания.
- Установлено наличие ферромагнитной фазы в наноразмерных поликристаллических LSMO плёнках даже при комнатных температурах, в то время как температура Кюри таких плёнок составляет около 180 К – т. е. наблюдается сильное температурное размытие фазового перехода.

### **Положения выносимые на защиту:**

1. Экспериментально установленная монотонно возрастающая зависимость показателя преломления  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_{3-\alpha}$  от дефицита кислорода  $\alpha$  описывается уравнением Клаузиуса-Моссотти с учётом наличия проводящих цепочек  $\text{Mn}^{3+}-\text{O}^{2-}-\text{Mn}^{4+}$ .
2. Спектрофотометрическим методом установлено появление в результате отжига максимума оптической проводимости при энергиях вблизи 1 эВ, коррелирующего с появлением дс-проводимости, магниторезистивного эффекта и ростом магнитной восприимчивости.
3. Для однозначного определения толщины сильно поглощающих тонкоплёночных покрытий и учёта шероховатости поверхности и переходного слоя «плёнка-подложка» был модифицирован метод Малина-Ведама.
4. Установлено, что учёт оптического пропускания при решении обратной задачи эллипсометрии минимизационным методом позволяет однозначно идентифицировать оптические параметры широкого спектра тонкоплёночных покрытий.

**Степень достоверности.** Достоверность результатов и обоснованность выводов диссертационного исследования определяется достаточным количеством экспериментов с использованием общепринятых методов исследований, отвечающих поставленным в работе задачам, а также целенаправленным подбором образцов LSMO плёнок. Результаты обработки экспериментальных данных, с использованием предлагаемых методик, воспроизводимы и согласуются с данными, полученными другими методами исследований, а также с рядом результатов и теоретических моделей, опубликованных в литературе другими авторами.

**Практическая ценность.** Предложенные методики обработки результатов эллипсометрических и спектрофотометрических измерений могут быть использованы для промышленного контроля качества LSMO плёнок при изготовлении высокочувствительных наноразмерных малоинерционных датчиков температуры и магнитного поля, электродов ввода спин-поляризованного тока в устройствах спинтроники, для получения плёнок с заданным содержанием кислорода, поверхностными свойствами, а также в процессе изготовления гетероструктур.

**Личный вклад соискателя** состоит в непосредственном участии в: определении способов решения поставленных задач, подготовке и проведении экспериментальных исследований свойств наноразмерных плёнок, проведении численных расчетов, обсуждении и анализе результатов. Соискатель принимал активное участие в написании статей и докладов, непосредственно выступал с докладами на научных конференциях.

Автором предложены усовершенствованные методики обработки результатов эллипсометрических измерений и создан основанный на них комплекс программ для ПЭВМ.

В работах [1а, 2а, 11а, 13а-17а, 19а, 20а] соискатель проводил обработку результатов эллипсометрических измерений.

В работах [3а, 4а, 18а, 28а, 32а] автор участвовал в обсуждении влияния содержания кислорода и процессов диффузии на оптические свойства плёнок.

В работах [5а-7а, 12а, 21а-27а, 29а-31а, 33а] соискатель проводил эллипсометрические и спектрофотометрические измерения, обрабатывал их результаты, готовил подложки для напыления и производил отжиг полученных плёнок.

В работах [8а, 9а] автором предложено дополнить минимизационный алгоритм решения ОЗЭ учётом данных об оптическом пропускании, а также предложен способ учёта сложной структуры границ [10а], разработаны соответствующие программы для ПЭВМ, выполнены вычисления.

**Апробация результатов диссертации.** Основные результаты представленной диссертации апробированы на следующих конференциях:

1. Eighth International Young Scientists Conference “Optics & High Technology Material Science SPO 2007”, (Киев, Украина 2007);
2. Міжнародна науково-практична конференція «Структурна релаксація у твердих тілах», (Вінниця, Україна, 2009);
3. Международная научная конференция «Актуальные проблемы физики твёрдого тела ФТТ-2009, 2013», (Минск, Беларусь, 2009, 2013);
4. International Workshop “Magnetic Phenomena in Micro- and Nano-Structures 2010”, (Donetsk, Ukraine, 2010);
5. International Conference of Young Scientists “Low Temperature Physics”, (Kharkiv, Ukraine, 2010);
6. International Conference “Functional Materials” ICFM-2011, (Partenit, Crimea, Ukraine, 2011);
7. Всеукраїнська конференція «Відкриті фізичні читання», (Алчевськ, Україна, 2012, 2014);
8. Joint European Magnetic Symposia JEMS 2012, (Parma, Italy, 2012);
9. European Materials Research Society Fall Meeting E-MRS 2012, 2014, (Warsaw, Poland, 2012, 2014);
10. Всеукраїнська конференція «Відкриті фізичні читання», (Луганськ, Україна, 2013);
11. Joint European Magnetic Symposia JEMS 2013, (Rhodes, Greece, 2013);
12. International research and practice conference “Nanotechnology and nanomaterials” (NANO-2013), (Bukovel, Ukraine, 2013);
13. SCN 2013 Fifth Seeheim Conference on Magnetism, (Frankfurt, Germany, 2013);
14. 4-th International Conference on Superconductivity and Magnetism ICFM 2014, (Antalya, Turkey, 2014);
15. European Materials Research Society Spring Meeting E-MRS 2015, (Lille, France, 2015);
16. Региональная научно-практическая конференция «Открытые физические чтения», (Луганск, 2015);

17. Пятая Международная научная конференция “ХИМИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА И КИНЕТИКА”, (Великий Новгород, Россия, 2015);
18. Международная научно-практическая конференция «Открытые физические чтения», (Луганск, 2016).
19. International Conference on "Physics, Mechanics of New Materials and Their Applications" (Surabaya, Indonesia, 2016)
20. Седьмая Международная научная конференция “Химическая термодинамика и кинетика” (Великий Новгород, Россия, 2017).
21. «Физика поверхностных явлений межфазных границ и фазовые переходы» PSP&PT-7 (Нальчик – Ростов-на-Дону – пос. Южный, 2017).  
Материалы диссертации также регулярно докладывались на семинарах отделов и ежегодных отчетных научных конференциях ДонФТИ им. А.А. Галкина.

**Публикации.** Результаты диссертационной работы опубликованы в 10 статьях в реферируемых научных журналах, в том числе 7 статей – в журналах, внесенных в базу данных SCOPUS и Web of Science, а также в 21 тезисе научных конференций, в том числе в сборниках трудов конференций – 2. *H*-индекс автора 3.

**Структура и объём диссертации** соответствует целям и задачам исследования, она состоит из введения, четырёх разделов, выводов и списка цитируемой литературы из 226 наименований. Работа изложена на 148 страницах, с 50 рисунками и 2 таблицами включительно.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы; показана связь работы с научными темами, планами и программами; сформулированы цели и задачи исследований; указаны предмет, объект и методы исследования; отмечено научную новизну работы, практическое значение полученных результатов и личный вклад соискателя; представлено сведения об апробации результатов работы на конференциях и публикациях по теме диссертации.

В **первом разделе** приведены общие сведения о незамещенных и замещенных манганитах лантана. При этом особое внимание уделено составам  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ . Как и все представители семейства твёрдых растворов  $R_{1-x}A_x\text{MnO}_3$  (где  $R$  – редкоземельный элемент, а  $A$  – щелочноземельный металл), они имеют кристаллическую структуру искажённого кубического перовскита.

Составы  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  при  $0,2 < x < 0,5$  обладают колоссальным отрицательным магниторезистивным эффектом, который обусловлен сосуществованием фаз «ферромагнитный металл» (фаза FM) – «антиферромагнитный диэлектрик» (фаза AFM) в широкой окрестности температуры Кюри ( $T_C$ ).



В основе проводимости манганитов лежит зарядовый обмен  $Mn^{4+} \leftrightarrow Mn^{3+}$ , который осуществляется в два этапа при участии лиганда и поэтому был назван Зенером «двойным обменом» [1]. Если такой обмен происходит в АФМ упорядоченном кристалле между ближайшими соседями с противоположными ориентациями спинов, то конечное состояние оказывается высоковозбужденным. В случае же параллельной ориентации спинов переход имеет резонансный характер.

Модель двойного обмена даёт качественное объяснение перехода металл-изолятор, однако в своём простейшем виде, не позволяет количественно описать наблюдаемые свойства манганитов. Более полно свойства манганитов описываются теориями, предполагающими конкуренцию между двойным обменом и каким-либо механизмом локализации носителей заряда. Наиболее распространенным является представление о формировании ян-теллеровских поляронов малого радиуса. Так, ян-теллеровские (ЯТ) искажения, вызванные наличием ионов  $Mn^{3+}$ , локализуют  $e_g$ -электроны в парамагнитной фазе. В низкотемпературной ФМ фазе уширение  $e_g$ -зоны приводит к «вымораживанию» ЯТ искажений и появлению металлической проводимости. Процесс оптической активации прыжков поляронов (переходов между  $e_g$  уровнями ионов  $Mn^{3+}$ ,  $Mn^{4+}$  с параллельной ориентации спинов) обладает характерной энергией около 1 эВ и порождает широкий максимум на спектрах оптической проводимости [4].

В манганитах с поликристаллической структурой помимо степени допирования важным параметром, определяющим их свойства, является размер зерна. Наличие межзёренных границ ограничивает движение носителей заряда, что, с уменьшением размеров зёрен, приводит к понижению температуры перехода металл-полупроводник, росту сопротивления в области низких температур, а также увеличению совокупного магниторезистивного эффекта, что объясняется вкладом межзёренного магнитосопротивления, обусловленного спин-зависимым туннелированием носителей заряда. Температура Кюри может отличаться от температуры перехода металл-полупроводник на десятки градусов и немонотонно зависит от размеров зёрен – с уменьшением их размеров незначительный рост  $T_C$  сменяется резким падением [5].

Тонкие плёнки манганитов по своим свойствам могут существенно отличаться от массивных образцов. Это обусловлено прежде всего наличием механических напряжений и пространственного ограничения подвижности носителей тока толщиной плёнки.

Во **втором разделе** даны краткие сведения о распространении поляризованного света в системах многих плоскопараллельных слоёв, связи показателя преломления с химическим составом и структурой вещества, а также методах эллипсометрических измерений.

Особое внимание уделено эллипсометрии, которая является важнейшим инструментом при изучении свойств наноразмерных пленок. В основе этого метода лежит регистрация изменения состояния поляризации

света в результате его взаимодействия с исследуемой поверхностью. Такое изменение характеризуется эллипсометрическими углами  $\Psi$  и  $\Delta$ , которые, в свою очередь, рассчитываются по результатам измерений поляризационных азимутов при отражении эллиптически поляризованного света [2].

Основное уравнение эллипсометрии имеет вид:

$$\operatorname{tg}\Psi \cdot e^{i\Delta} = \frac{\bar{r}^p}{\bar{r}^s},$$

где  $\bar{r}^p$  и  $\bar{r}^s$  – обобщённые амплитудные коэффициенты отражения р- и s-составляющих электромагнитной волны, соответственно. Значения этих коэффициентов определяются структурой, оптическими свойствами поверхности и обрамляющих сред, длиной волны зондирующего излучения  $\lambda$ , а также углом падения  $\varphi_0$ .

Решение ОЗЭ в большинстве случаев связано со значительными трудностями, так как она относится к классу некорректно поставленных задач [6]. Этим, а также сложной структурой поверхности, и, как следствие, существованием множества различных моделей последней, обусловлено и наличие различных методов решения ОЗЭ. Кроме того, выбор методов решения обратной задачи зависит и от способа проведения эллипсометрических измерений.

При измерениях методом многоугольной отражательной эллипсометрии одним из наиболее распространённых методов решения обратной задачи для однослойных покрытий является метод Малина-Ведама [2]. Суть метода Малина-Ведама заключается в следующем:

Основное уравнение эллипсометрии представляется в форме биквадратного уравнения относительно неизвестного фазового множителя  $X = \exp\left(-i\frac{4\pi}{\lambda}N_f d_f \cos\varphi_f\right)$ , где  $N_f = n_f - ik_f$  – комплексный показатель преломления плёнки толщиной  $d_f$ , и  $\varphi_f$  – также комплексный угол преломления в ней. Далее используя численные методы и номограммы, находится такая пара значений показателя преломления  $n_f$  и коэффициента экстинкции  $k_f$ , которая удовлетворяет основному уравнению эллипсометрии при любом значения угла падения и равенстве нулю мнимой части значения толщины плёнки.

Наиболее общим методом решения обратной задачи является минимизационный метод. Этот метод требует рассматривать процесс решения ОЗЭ как процесс минимизации некой целевой функции в многомерном параметрическом пространстве, где в роли независимых переменных выступают величины, подлежащие определению. Выбор такой функции, вообще говоря, неоднозначен и производится из соображений удобства и простоты вычислений, однако она должна иметь глобальный минимум при условии равенства значений эллипсометрических углов  $\Psi^c$ ,  $\Delta^c$ , вычисленных в рамках предполагаемой модели поверхности,

экспериментальным значениям  $\Psi^e$ ,  $\Delta^e$ . Простейшая целевая функция имеет вид:

$$G = \sum_{m=1}^W \left[ \left( \frac{\Psi_m^e - \Psi_m^c}{\Psi_m^e} \right)^2 + \left( \frac{\Delta_m^e - \Delta_m^c}{\Delta_m^e} \right)^2 \right],$$

где  $W$  – количество измерений при различных углах падения.

В **третьем разделе** предлагается модификация метода Малина-Ведама, для более точного определения толщины и оптических параметров материала пленки. Её суть состоит в том, что при отборе возможных корней основного уравнения эллипсометрии учитываются не только значения их модулей, но и фаз [9а, 11а].

При решении ОЗЭ минимизационным методом предложено включить в целевую функцию дополнительную информацию, полученную другими методами – например, результаты измерений коэффициентов отражения или пропускания на длине волны эллипсометрических измерений. В частности, такая расширенная целевая функция с использованием коэффициента оптического пропускания имеет вид:

$$G' = W \frac{(\bar{T}^e - \bar{T}^c)^2}{(\bar{T}^e)^2} + \sum_{w=1}^W \left( \frac{(\Psi_w^e - \Psi_w^c)^2}{(\Psi_w^e)^2} + \frac{(\Delta_w^e - \Delta_w^c)^2}{(\Delta_w^e)^2} \right),$$

где  $\bar{T}^e$  – экспериментально измеренное значение пропускания, а  $\bar{T}^c$  – значение пропускания, вычисленное в рамках предполагаемой модели поверхности.

Разумеется, функция  $G'$  также (как и любая другая) характеризуется набором локальных минимумов. Однако совпадение таких минимумов для целевых функций  $G$  и  $G'$  позволяет судить о значениях искомых параметров. Для однослойных покрытий предложенный метод допускает наглядную графическую иллюстрацию [8а, 9а]. В случае же сильно поглощающих пленок достаточно минимизировать лишь функцию  $G$ , либо отдать модифицированному методу Малина-Ведама как менее затратному по времени выполнения необходимых расчетов и, кроме того, не требующего дополнительных независимых измерений.

Предложена модель тонкоплёночного покрытия, учитывающая сложную структуру границ [10а]. Нарушенная структура границы среда – пленка (af) и пленка – подложка (fw) представляются как совокупность однородных физически бесконечно тонких слоев, характеризующимися макроскопическими оптическими параметрами. Показатели преломления и поглощения каждого из таких слоёв могут быть назначены в соответствии с тем или иным заранее выбранным законом изменения оптических свойств на границах af, fw. Такая модель позволяет применять методы решения ОЗЭ предназначенные для однослойной модели поверхности к нахождению параметров материала плёнки с учётом вклада границ в свойства покрытия.

Также рассмотрены вопросы ограничения применимости одно- и многослойных моделей связанные с глубиной проникновения оптического

излучения в поглощающих средах [2а] и погрешностью эллипсометрических измерений. Последняя, в частности, определяет количества переходных слоёв на границах af, fw описанной выше модели.

**В четвёртом разделе** указаны режимы получения и термообработки исследованных пленок состава  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_{3-\alpha}$ , даны описания экспериментальных установок и процедуры измерений. Представлены результаты исследования структуры, оптических, магнитных и магниторезистивных свойств указанных плёнок [1а, 3а, 4а, 5а, 6а, 12а]. При этом основное внимание уделено поликристаллическим плёнкам. Предложен оптический метод оценки дефицита содержания кислорода  $\alpha$ , в LSMO-плёнках [7а].

Исследованные LSMO-пленки получены по усовершенствованной технологии dc-магнетронного распыления керамической мишени стехиометрического состава  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  [7], однофазность которого подтверждена методом рентгеноструктурного анализа. Кристаллическая структура исследованных плёнок определялась структурой поверхности подложек: эпитаксиальные плёнки были получены на подложках  $\text{SrTiO}_3$  (110), и  $\text{NdGaO}_3$  (001), а поликристаллические – на кристаллических подложках  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (012),  $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$  (111) (далее обозначены как АО и GGG, соответственно) и поликристаллических подложках  $\text{AlGaO}_3$  (AGO). Одна из плёнок на подложке  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (012) была получена при комнатной температуре (соответствующие данные на графиках помечены звёздочкой). Отжиг пленок осуществлялся на воздухе при температуре 850-950 °С, как описано в работах [1а, 5а, 6а].

Эллипсометрические измерения проводились на длине волны 632,8 нм с помощью многоуглового нуль-эллипсометра, построенного по схеме PCSA.

Спектрофотометрические измерения выполнены на спектрофотометре Shimadzu UV-2450 с использованием специально сконструированных держателей-переходников для установки твердотельных образцов в штатный держатель кювет.

Измерения температурного хода проводимости проводились на постоянном токе стандартным четырехзондовым методом, измерения магнитной восприимчивости – дифференциальным динамическим методом на частоте 1 кГц. Исследован диапазон температур от 77 до 400 К.

Рентгеноструктурные измерения производились на дифрактометре ДРОН-3, оснащённом модернизированной системой автоматического управления и регистрации данных.

Неотожжённые поликристаллические плёнки характеризуются неоднородностью оптических свойств по толщине, обусловленной конкурирующим влиянием на них шероховатости и дефицита содержания кислорода (см. ниже). Для массива же плёнки в целом наблюдаются размерные эффекты – Рис. 1а. При этом оптическая проводимость неотожжённых поликристаллических плёнок почти на порядок ниже оптической проводимости неотожженных эпитаксиальных.

Показатель преломления и коэффициент экстинкции неотожжённых эпитаксиальных плёнок не проявляет заметной неоднородности по толщине, однако их поверхность также более дефектна, на что указывает больший коэффициент диффузии кислорода [3а].

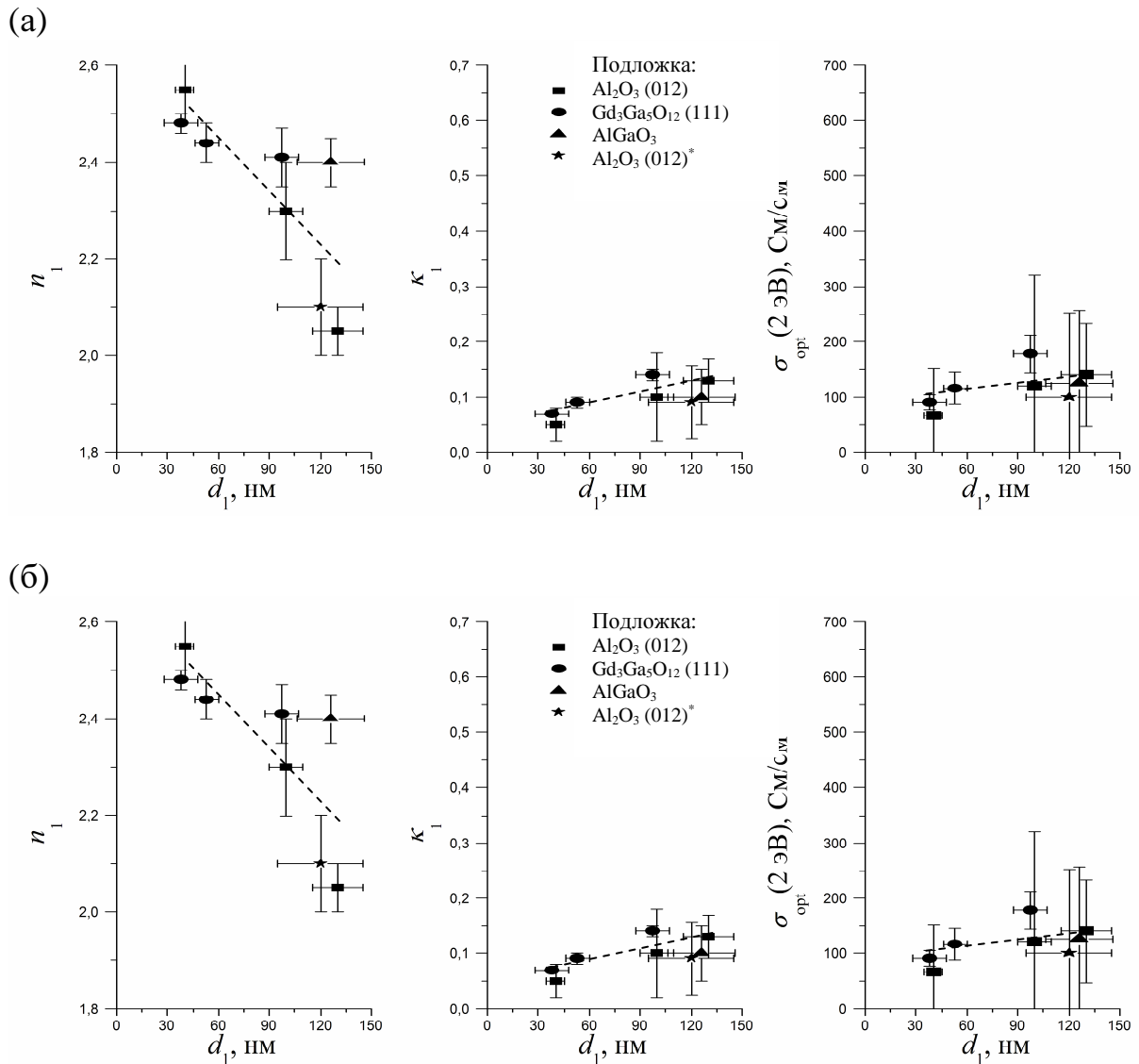


Рис. 1. Эффективные значения показателя преломления  $n_1$ , коэффициента затухания  $\kappa_1$  и оптической проводимости  $\sigma_{\text{opt}}$  в зависимости от эффективной толщины неотожжённых (а) и отождённых (б) поликристаллических LSMO плёнок.

Оптическая проводимость неотожжённых эпитаксиальных плёнок при энергиях фотонов вблизи 2 эВ –  $\sigma_{\text{opt}}(2 \text{ эВ})$  близка к Моттовскому пределу проводимости ( $\sim 500 \text{ См/см}$ ), несмотря на то, что их проводимость на постоянном токе, измеренная при комнатной температуре в отсутствии магнитного поля, существенно ниже этого предела. Неотожженные поликристаллические плёнки являются рентгеноаморфными и не проявляют заметного ферромагнетизма и проводимости на постоянном токе. Также в их

спектрах оптической проводимости отсутствует максимум при энергиях вблизи 1 эВ, что указывает на причину диэлектрических свойств неотожженных поликристаллических плёнок – отсутствие проводящих цепочек  $\text{Mn}^{3+} - \text{O}^{2-} - \text{Mn}^{4+}$ .

Отжиг приводит к понижению показателя преломления всех исследованных плёнок. При этом свойства поликристаллических плёнок приближаются к свойствам эпитаксиальных. Так, коэффициент экстинкции и оптическая проводимость возрастают (Рис. 1б), а на спектрах оптической проводимости появляется максимум вблизи 1 эВ (Рис. 2). Последнее, является ярким свидетельством устранения дефицита кислорода.

Близкие значения оптических параметров отожжённых пленок различной толщины  $d_l$  на разных подложках свидетельствуют о независимости этих свойств от интерфейса, т.е. об определяющем вкладе в оптические свойства LSMO пленок процессов самоорганизации их структуры.

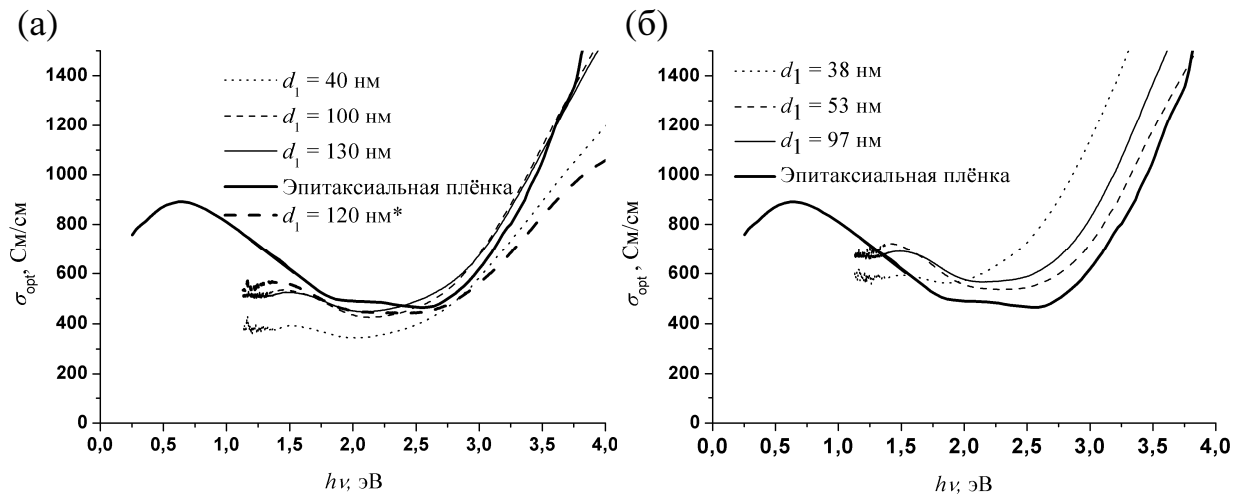


Рис. 2. Спектральные зависимости оптической проводимости отожжённых поликристаллических плёнок на подложках АО (а) и GGG (б) в сравнении с эпитаксиальной плёнкой [4].

Общее смещение спектров оптической проводимости в область более высоких энергий сильнее связано с наличием межзеренных границ, чем с влиянием интерфейса подложка-плёнка, так как практически не зависит от толщины последней.

Коэффициент преломления монокристаллов состава  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_{3-\alpha}$  в области длин волн, соответствующих оптическому возбуждению магнитных поляронов, но отстоящей достаточно далеко от края фундаментального поглощения можно вычислить, основываясь на использовании молекулярных ионных и кристаллических ковалентных рефракций с учетом экранирующего действия носителей заряда, непосредственно связанного с дефицитом кислорода  $\alpha$  (Рис. 3) [7а]. В частности, это позволяет использовать

измерения коэффициента преломления для оценки дефицита кислорода в эпитаксиальных плёнках.

Значения кислородного дефицита, полученные этим методом для отожжённых и неотожжённых эпитаксиальных плёнок, полностью согласуются со значениями, полученными по температуре перехода металл-полупроводник [1a].

Однако, результаты исследований поликристаллических плёнок,

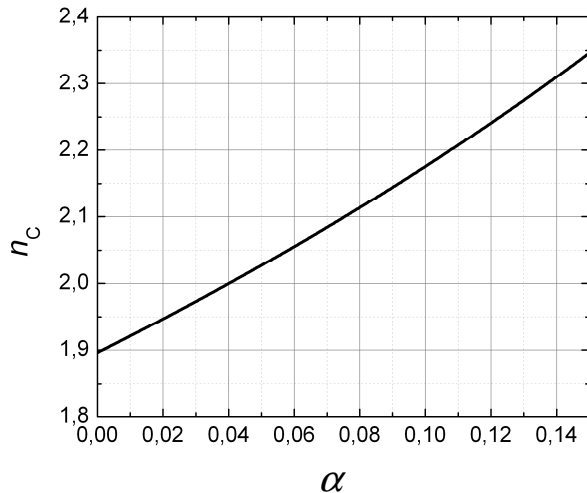


Рис. 3. Расчетная зависимость показателя преломления от кислородного индекса.

показывают, что значение их показателя преломления до отжига существенно превышает соответствующее значение эпитаксиальных плёнок, а оптическая проводимость – ниже, чем у эпитаксиальных плёнок. Очевидно, что такое различие не может быть связано с собственно дефицитом кислорода – оно обусловлено локализацией носителей зарядов границами зёрен. Таким образом, наблюдаемая тенденция неотожжённых плёнок к росту показателя преломления и падению оптической проводимости с уменьшением толщины, в значительной степени связана не с кислородным индексом, а с возрастающим деструктивным влиянием границы пленка-подложка.

Ос-проводимость отожжённых эпитаксиальных плёнок возрастает, достигая Моттовского предела, при этом в бездефицитных по кислороду плёнках наблюдается соответствие между  $\sigma_{opt}$  (2 эВ) и ос-проводимостью при температуре перехода «металл-полупроводник»  $\sigma_{dc}(T_{MI})$  [1a]. Отжиг поликристаллических плёнок также повышает их ос-проводимость, которая, однако, на два порядка меньше величины ос-проводимости эпитаксиальных плёнок, что характерно для поликристаллических плёнок. В отличие от оптической проводимости отожжённых плёнок она весьма чувствительна к толщине. Температурные зависимости ос-проводимости, магнитосопротивления и намагниченности отожжённых поликристаллических плёнок, с ростом толщины последних, стремятся к виду характерному для массивных поликристаллов. Сопротивления плёнок толщиной менее 50 нм на порядки превосходят сопротивления более толстых плёнок и обладают иной (характерной для полупроводников) температурной зависимостью. Это свидетельствует о влиянии интерфейса на размеры зерен в пограничной области, которая даёт значительный вклад в свойства сверхтонких плёнок.

В **выводах** в тезисной форме представлены основные результаты диссертационной работы.

## ВЫВОДЫ

1. Предложен и внедрён бесконтактный неразрушающий оптический метод контроля дефицита содержания кислорода в наноразмерных LSMO-плёнках, основанный на сопоставлении результатов эллипсометрических измерений показателя преломления с его расчётным значением.
2. Предложенный метод расчёта показателя преломления составов  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_{3-\alpha}$  применим для всей области существования ферромагнитной фазы.
3. Неотожжённые поликристаллические плёнки, в отличие от неотожжённых эпитаксиальных, характеризуются неоднородностью оптических свойств по толщине, хотя структура эпитаксиальных также несколько неоднородна, на что указывает неоднородность коэффициента диффузии кислорода.
4. Отжиг устраняет неоднородность оптических свойств поликристаллических плёнок и приближает их к оптическим свойствам массивного материала.
5. Различия температурных зависимостей сопротивления, магнитосопротивления и намагниченности поликристаллических плёнок различной толщины объясняются влиянием размеров зёрен, которые ограничены толщиной плёнки, а также влиянием границы с подложкой.
6. Установлено, что величина оптической проводимости ( $\sigma_{\text{opt}}$ ) при энергии кванта излучения 2 эВ является предельно достижимой для минимальной величины  $\sigma_{\text{dc}}(T_m)$  в бездефицитной по кислороду эпитаксиальной пленке, которая определяется плотностью носителей зарядов.

## СПИСОК ЦИТИРУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Haghiri-Gosnet, A.-M. CMR manganites: physics, thin films and devices / A.-M. Haghiri-Gosnet and J.-P. Renard // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2003. – V. 36. – P. R127–R150.
2. Громов В.К. Введение в эллипсометрию: Учебное пособие. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1986, 189 с.
3. Zener, C. Interaction between the d shells in the transition metals / C. Zener // Phys. Rev. – 1951. – V. 81, No. 3. – P. 440–443.; Zener, C. Interaction between the d-Shells in the Transition Metals. II. Ferro-magnetic Compounds of Manganese with Perovskite Structure / C. Zener // Phys. Rev. – 1951. – V. 82, No. 3. – P. 403–406.
4. Quijada, M. Optical conductivity of manganites: Crossover from Jahn-Teller small polaron to coherent transport in the ferromagnetic state / M. Quijada, J. Cerne, J. R. Simpson, H. D. Drew, K. H. Ahn, A. J. Milis, R. Shreekala,



- R. Ramesh, M. Rajtswari, T. Venjatesan // *Phys. Rev. B.* – 1998. – V. 58, No. 24. – P. 16093–16102.
5. Sarkar, T. Effect of size reduction on the ferromagnetism of the manganite  $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$  ( $x = 0.33$ ) / T. Sarkar, A. K. Raychaudhuri, A. K. Bera and S. M. Yusuf // *New Journal of Physics* – 2010. – V. 12. – P. 123026(21 p.).
6. Воеводина, С. Н. К вопросу об определении параметров тонких слоев / С. Н. Воеводина, А. В. Тихонравов // *Оптика и спектроскопия.* – 1990. – Т. 68, Вып. 4. – С. 927 – 931.
7. Николаенко, Ю. М. Получение высококачественных пленок на основе манганита на усовершенствованной магнетронной приставке ВУП-5М / Ю. М. Николаенко, А. Б. Мухин, В. А. Чайка, В. В. Бурховецкий // *ЖТФ.* – 2010. Т. 80. Вып. 8. – С. 115–119.

### СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- 1а. Варюхин, В. Н. Проводимость  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_{3-\alpha}$  плёнок при малых отклонениях от стехиометрического состава по кислороду / В. Н. Варюхин, Ю. В. Медведев, Ю. М. Николаенко, А. Б. Мухин, Б. В. Беляев, В. А. Грицких, И. В. Жихарев, С. В. Кара-Мурза, Н. В. Корчикова, А. А. Тихий // *Письма в ЖТФ.* – 2009. – Т. 35, вып. 20. – С. 19–26.
- 2а. Жихарев, И. В. Учёт явления скин-эффекта при интерпретации результатов эллипсометрических измерений / И. В. Жихарев, А. А. Тихий, Б. В. Беляев, В. А. Грицких, С. В. Кара-Мурза, Н. В. Корчикова, Ю. М. Николаенко // *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля.* – 2010. – № 8 (150), Ч. 2. – С. 60–63.
- 3а. Nikolaenko, Yu. M. Non-uniform oxygen diffusion in epitaxial  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_{3-\alpha}$  film on  $\text{SrTiO}_3$  substrate / Yu. M. Nikolaenko, A. N. Artemov, Yu. V. Medvedev, N. B. Efros, I. V. Zhikharev, I. Yu. Reshidova, A. A. Tikhii and S. V. Kara-Murza // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2016. – V. 49. – P. 375302(7 p.).
- 4а. Nikolaenko, Yu. M. Optimum oxygen content in  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  thin films / Yu. M. Nikolaenko, V. N. Varyukhin, Yu. V. Medvedev, N. B. Efros, I. V. Zhikharev, S. V. Kara-Murza, A. A. Tikhii // *Preprint ArXiv: 1111.7180 [cond-mt.mtrl-sci].* – 2011.
- 5а. Tikhii, A. Optical conductivity of LSMO films on  $\text{Al}_2\text{O}_3$  substrates / A. Tikhii, V. Gritskih, S. Kara-Murza, N. Korchikova, Yu. Nikolaenko, I. Zhikharev // *Physica Status Solidi C.* – 2013. – V. 10, No. 4. – P. 673–676.
- 6а. Тихий, А. А. Оптические и магниторезистивные свойства поликристаллических LSMO-пленок на кристаллических подложках  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$  / А. А. Тихий, В. А. Грицких, С. В. Кара-Мурза, Н. В. Корчикова, Ю. М. Николаенко, Ю. Ф. Ревенко, И. Ю. Решидова, И. В. Жихарев // *ФНТ.* – 2014. – Т. 40, № 8. – С. 968–974.

- 7а. Тихий, А.А. Определение уровня кислородной нестехиометрии пленок  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_{3-\alpha}$  на оксидных подложках методом структурной рефрактометрии / А. А. Тихий, С. В. Кара-Мурза, Ю. М. Николаенко, В. А. Грицких, Н. В. Корчикова, И. В. Жихарев // Неорганические материалы. – 2015. – Т. 51, № 9, – С. 1008–1012.
- 8а. Беляев, Б. В. Комплексная методика оптических исследований тонкоплёночных покрытий / Б. В. Беляев, В. А. Грицких, И. В. Жихарев, С. В. Кара-Мурза, Н. В. Корчикова, А. А. Тихий // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2007. – №4 (110), Ч. 1. – С. 131–134.
- 9а. Тихий, А. А. Особенности интерпретации результатов эллипсометрических измерений / А. А. Тихий, В. А. Грицких, С. В. Кара-Мурза, Ю. М. Николаенко, И. В. Жихарев // Оптика и спектроскопия. – 2012. – Т. 112, № 2. – С. 338–343.
- 10а. Тихий, А. А. Эллипсометрический метод определения оптических параметров тонкопленочных покрытий со сложной структурой / А. А. Тихий, В. А. Грицких, С. В. Кара-Мурза, Н. В. Корчикова, Ю. М. Николаенко, В. В. Фарапонов, И. В. Жихарев // Оптика и спектроскопия. – 2015. – Т. 119, № 2, – С. 282–286.
- 11а. Беляев, Б. В. Особенности эллипсометрических исследований тонкоплёночных сильно поглощающих покрытий / Б. В. Беляев, В. А. Грицких, И. В. Жихарев, С. В. Кара-Мурза, Н. В. Корчикова, Ю. М. Николаенко, А. А. Тихий // Сборник докладов Международной научной конференции «Актуальные проблемы физики твёрдого тела ФТТ-2009» (Минск, 20-23 октября 2009), Минск: ЧПУП «ЮВА». – 2009. – Т. 3. – С. 169–170.
- 12а. Жихарев, И. В. Оптические и магниторезистивные свойства тонких плёнок LSMO на подложках  $\text{Al}_2\text{O}_3$  / И. В. Жихарев, В. А. Грицких, С. В. Кара-Мурза, Н. В. Корчикова, Ю. М. Николаенко, Ю. Ф. Ревенко, А. А. Тихий // Актуальные проблемы физики твёрдого тела: сб. докл. Междунар. науч. конф., (Минск, 15-18 окт. 2013). В 3 т. Т. 1 / ГНПО «ГНПЦ НАН Беларуси по материаловедению»; – Минск: Ковчег, 2013. – С. 205–207.
- 13а. Tihiy, A. A. Optimization procedure of solving an inverse problem of ellipsometry for absorbing thin-film overcoats in view of experimentally measured system's optical transmission of a film – a transparent substrate / A. A. Tihiy, S. V. Kara-Murza, B. V. Belyaev, V. A. Gritskih, I. V. Zhikharev / Eighth International Young Scientists Conference “Optics & High Technology Material Science SPO 2007”, (Kyiv, October 25-28). – Kyiv, 2007. – P. 25.
- 14а. Беляев, Б. В. Оптические измерения межкластерной проводимости плёнок  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_{3-\delta}$ . / Б. В. Беляев, В. А. Грицких, И. В. Жихарев, С. В. Кара-Мурза, Н. В. Корчикова, Ю. М. Николаенко, А. А. Тихий / Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Структурна

- релаксація у твердих тілах» (Вінниця, 19-21 травня). – Вінниця: ТОВ «Планер», 2009. – С. 122–124.
- 15a. Tikhy, A. A. The influence of deposition's regimes and annealing on  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$  (LSMO) films' optical conductivity / A. A. Tikhy, B. V. Belyaev, V. A. Gritskih, S. V. Kara-Murza, N. V. Korchikova, Yu. M. Nikolaenko, I. V. Zhikharev / International Workshop "Magnetic Phenomena in Micro- and Nano- Structures 2010", 27-29 May 2010. – Donetsk. – P. 62–63.
- 16a. Nikolaenko, Yu. M. Sensitivity of  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_{3-\delta}$  film conductance to the oxygen stoichiometry / Yu. M. Nikolaenko, Yu. V. Medvedev, A. B. Mukhin, B. V. Belyaev, V. A. Gritskih, I. V. Zhikharev, S. V. Kara-Murza, N. V. Korchikova, A. A. Tikhiy / International Conference "Functional Materials" ICFM-2009. – Ukraine, Crimea, Partenit, 2009. – P. 152.
- 17a. Tikhy, A. A. Optical investigations of  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$  thin films transport properties dependents on technique of their producing and annealing. / A. A. Tikhy, B. V. Belyaev, V. A. Gritskih, S. V. Kara-Murza, N. V. Korchikova, Yu. M. Nikolaenko, I. V. Zhikharev / International Conference of Young Scientists "Low Temperature Physics" Conference programme and Abstracts book, 7-11 June 2010, Kharkiv, – P. 95.
- 18a. Nikolaenko, Yu. M. Magnetotransport of epitaxial  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_{3-\delta}$  films in the vicinity of oxygen stoichiometric state (deficit end excess of oxygen) / Yu. M. Nikolaenko, Yu. V. Medvedev, N. B. Efros, I. V. Zhikharev, S. V. Kara-Murza, A. A. Tikhy / International Conference "Functional Materials" ICFM-2011, Abstracts, Ukraine, Crimea, Partenit, 2011. – P. 47.
- 19a. Тихий, А. А. Зависимость свойств LSMO плёнок от технологии их получения / А. А. Тихий, С. В. Кара-Мурза, Ю. М. Николаенко, В. А. Грицких, Н. В. Корчикова, И. В. Жихарев / Всеукраїнська конференція «Відкриті фізичні читання» (11 травня, м. Алчевськ): Збірник тез доповідей – Алчевськ: ДонДТУ, 2012. – с. 10–11.
- 20a. Тихий, А. А. Об использовании оптических методов для контроля качества LSMO плёнок. А. А. Тихий, С. В. Кара-Мурза, Ю. М. Николаенко, В. А. Грицких, Н. В. Корчикова, И. В. Жихарев / Відкриті фізичні читання: тези доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції 25 травня 2013 р./ за ред. Г.М. Хорошун – Луганськ, 2013. – С. 17.
- 21a. Tikhii, A. A. Optical and magnetoresistive properties of the LSMO thin films on GGG substrates. / A. A. Tikhii, S. V. Kara-Murza, N. V. Korchikova, N. B. Efros, Yu. M. Nikolaenko, I. V. Zhikharev / Joint European Magnetic Symposia JEMS 2013, 25-30 August 2013, Rodos, Greece / 2013 – P. 49. – Електрон. дан. (1 файл: 103185662 байта).
- 22a. Tikhii, A. A. The effect of thickness on magnetic and magnrtoresistive properties / A. A. Tikhii, S. V. Kara-Murza, N. V. Korchikova, N. B. Efros, Yu. M. Nikolaenko, Yu. F. Revenko, I. V. Zhikharev / The International Summer School "Nanotechnology: from fundamental research to innovations" and International research and practice conference "Nanotechnology and

- nanomaterials” (NANO-2013) Abstract. Book of participants of the International Summer School and International research and practice conference, August 25 – September 1, 2013 / Prof. Leonid Yatsenko (Ed.). – Lviv: Evrosvit, 2013. – P. 167.
- 23a. Nikolaenko, Yu. M. Post-annealing tuning of magnetotransport in epitaxial  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_{3-\delta}$  films / Yu. M. Nikolaenko, Yu. V. Medvedev, N. B. Efros, I. V. Zhikharev, S. V. Kara-Murza, A. A. Tikhii / Fifth Seeheim Conference on Magnetism SCM 2013 (September 29, 2013 – October 3, 2013), Program and Abstracts, Frankfurt, Germany, 2013. – P–73.
- 24a. Tikhii, A. A. The peculiarities of the optical and magnetoresistive properties of the polycrystalline La-Sr-Mn-O thin films on GGG substrates / A. A. Tikhii, V. A. Gritskih, S. V. Kara-Murza, N. V. Korchikova, N. B. Efros, Yu. M. Nikolaenko, I. V. Zhikharev / 4-th International Conference on Superconductivity and Magnetism ISFM 2014 (27 April – 2 May 2014) Antalya, Turkey. – P. 415.
- 25a. Тихий, А. А. Магнитные и магниторезистивные свойства поликристаллических плёнок LSMO. / А. А. Тихий, С. В. Кара-Мурза, Ю. М. Николаенко, В. А. Грицких, Н. В. Корчи́кова, И. В. Жихарев / Всеукраїнська конференція «Відкриті фізичні читання» (16 травня, м. Алчевськ): Збірник тез доповідей – Алчевськ: ДонДТУ, 2014. – С. 5–6.
- 26a. Tikhii, A. A. Determination of the oxygen-deficient in epitaxial and polycrystalline films of  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$  by structural refractometry. / A. A. Tikhii, V. A. Gritskih, S. V. Kara-Murza, N. V. Korchikova, Yu. M. Nikolaenko, I. V. Zhikharev / E-MRS 2014, Fall Meeting, September 15-18, Warsaw University of Technology, Poland. – V.V I.12. – Access mode: <https://www.european-mrs.com/2014-fall-symposium-v-european-materials-research-society>
- 27a. Tikhii, A. A. The variation of optical and magnetoresistive properties of LSMO thin films on  $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$  substrates at different regimes of annealing / A. A. Tikhii, V. A. Gritskih, S. V. Kara-Murza, N. V. Korchikova, Yu. M. Nikolaenko, I. Yu. Reshidova, I. V. Zhikharev / E-MRS 2015 Spring Meeting, Lille (France), from May 11 to 15 2015. – M.P. 23 – Access mode: <https://www.european-mrs.com/2015-spring-symposium-m-european-materials-research-society>
- 28a. Николаенко, Ю. М. Кинетическая реализуемость равновесного содержания кислорода в эпитаксиальных LSMO пленках на  $\text{SrTiO}_3$  подложках / Ю. М. Николаенко, А. Н. Артемов, Ю. В. Медведев, Н. Б. Эфрос, А. А. Тихий, С. В. Кара-Мурза, И. В. Жихарев, Ю. А. Гененко, Е. И. Диденко / Пятая Международная научная конференция “Химическая термодинамика и кинетика” Великий Новгород, 25-29 мая 2015 г. – С. 148–151.
- 29a. Жихарев, И. В. Определение дефицита содержания кислорода в плёнках  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_{3-\delta}$  на основании эллипсометрических измерений / И. В. Жихарев, В. А. Грицких, С. В. Кара-Мурза, Н. В. Корчи́кова, Ю. М. Николаенко, А. А. Тихий / Международная научнопрактическая

конференция “Открытые физические чтения”. Тезисы докладов, 20 мая 2016, Луганск – С. 36.

- 30а. Жидель, К. М. Феноменологический способ оценки оптических параметров пленок замещенных манганитов лантана / Н. В. Корчикова, В. А. Грицких, Ю. М. Николаенко, И. В. Жихарев, С. В. Кара-Мурза / Международная научно-практическая конференция "Открытые физические чтения – 2017" Луганск 2017 / Вестник Луганского национального университета имени Владимира Даля. – 2017. – № 2, Ч. 1. – С. 45–48.
- 31а. Gritskikh, V. A. The Complex Method for Researching the Optical Parameters of LSMO Thin-Films / V. A. Gritskikh, I. V. Zhikharev, S. V. Kara-Murza, A. A. Tikhii, N. V. Korchikova, T. V. Krasnyakova, Yu. M. Nikolaenko, A. V. Pavlenko, Yu. I. Yurasov / Proceedings of the 2016 International Conference on "Physics, Mechanics of New Materials and Their Applications" Surabaya, Indonesia, July 19-22, 2016 / Ivan A. Parinov, Shun-Hsyung Chang, Muaffaq A. Jani (Eds.). / Nova Science Publishers, Inc. – Hauppauge, New York, 2017. – P. 307–314.
- 32а. Медведев, Ю. В. Диффузия кислорода в эпитаксиальной пленке  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_{3-\delta}$  / Ю. В. Медведев, Ю. М. Николаенко, А. Н. Артемов, Н. Б. Эфрос, И. Ю. Решидова, А. А. Тихий, С. В. Кара-Мурза, И. В. Жихарев / Седьмая Международная научная конференция “Химическая термодинамика и кинетика” г. Великий Новгород, 29 мая – 2 июня 2017 г. / С. 184–185.
- 33а. Грицких, В. А. Методы обработки результатов эллипсометрических измерений / В. А. Грицких, И. В. Жихарев, С. В. Кара-Мурза, Н. В. Корчикова, Ю. М. Николаенко, А. А. Тихий / Труды международного междисциплинарного симпозиума «Физика поверхностных явлений межфазных границ и фазовые переходы» PSP&PT-7, 16-21 сентября 2017 г., г. Нальчик – г. Ростов-на-Дону – г. Грозный – пос. Южный (п. Южный) – Ростов-на-Дону, Фонд науки и образования. 2017 Вып. 7, Т. 1. – С. 53–57.

## АННОТАЦИЯ

**Тихий А. А. Оптические и резистивные свойства нестехиометрических магнитных пленок на основе манганит-лантановых соединений. – Рукопись.**

Диссертация на соискание научной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния – Государственное учреждение “Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина”, Донецк, 2018.

Исследованы и описаны оптические свойства поликристаллических и эпитаксиальных LSMO плёнок полученных методом dc-магнетронного распыления мишени состава  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  в атмосфере аргон-кислород в зависимости от последующей термообработки.

Экспериментально установлена и объяснена монотонно возрастающая зависимость показателя преломления  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_{3-\alpha}$  от дефицита кислорода, на основании чего предложен и внедрён бесконтактный неразрушающий оптический метод контроля дефицита содержания кислорода в наноразмерных LSMO-плёнках. Предложенный метод расчёта показателя преломления составов  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_{3-\alpha}$  применим для всей области существования ферромагнитной фазы.

Предложена комплексная методика оптических исследований тонких LSMO плёнок, основанная на совместном использовании результатов многоугловых эллипсометрических и спектрофотометрических измерений. Разработаны и реализованы программно соответствующие алгоритмы интерпретации результатов оптических измерений для исследования свойств одно- и многослойных поглощающих покрытий, в том числе со сложной структурой границ.

Ключевые слова: эллипсометрия, спектрофотометрия, LSMO плёнки, дефицит кислорода, размерные эффекты, магниторезистивный эффект.

## ABSTRACT

**Tikhii A. A. Optical and resistive properties of nonstoichiometric magnetic films based on manganite-lanthanum compounds. - Manuscript.**

Thesis for a Candidate's degree in Physics and Mathematics in specialty 01.04.07 – condensed matter physics. – Public Institution “Donetsk Institute for Physics and Engineering named after A.A. Galkin”, Donetsk, 2018.

The optical properties of polycrystalline and epitaxial LSMO films obtained by the dc-magnetron sputtering of a target of  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  composition in an argon-oxygen atmosphere are studied and described, depending on the subsequent heat treatment.

A monotonically increasing dependence of the refractive index  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_{3-\alpha}$  on the oxygen deficit was experimentally found and theoretically explained. Based on this, a noncontact non-destructive optical method for

monitoring oxygen deficiency in nanosized LSMO films was proposed and introduced. The proposed method for calculating the refractive index of  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_{3-\alpha}$  compounds is applicable for the entire region of existence of the ferromagnetic phase.

A complex method of optical investigation of thin LSMO films is proposed, based on the joint use of the results of multi-angle ellipsometric and spectrophotometric measurements. Related algorithms are developed and implemented as software for interpreting the results of optical measurements to study the properties of single- and multi-layer absorbing coatings, including those with a complex boundary structure.

Keywords: ellipsometry, spectrophotometry, LSMO films, oxygen deficiency, size effects, magnetoresistance.