

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н., доцента Шерстюк Наталии Эдуардовны
о диссертационной работе Лукьянцева Дениса Сергеевича
«Метод контролируемого формирования наноструктурированных металл-оксидных плёнок», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.5. Физическая электроника

Диссертационная работа Лукьянцева Д.С. посвящена актуальной теме – развитию метода формирования наноструктурированных металл-оксидных плёнок с *in situ* контролем их химического состава с субнанометровой точностью. Интерес к данной тематике обусловлен не только задачей создания сложных функциональных устройств на основе неоднородных кислородосодержащих металлических плёнок толщиной менее 10 нм, но и необходимостью совершенствования неразрушающих аналитических методов исследования с высоким пространственным разрешением.

С целью повышения чувствительности химического анализа в работе впервые предложен метод, позволяющий не только определять химический и фазовый состав по глубине с субнанометровым разрешением, но и оценивать средние размеры наноразмерной шероховатости поверхности. На основе численного моделирования фотоэлектронной эмиссии установлены закономерности влияния наноразмерного рельефа поверхности на формирование спектра, что позволяет корректно учитывать данный эффект при анализе данных рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Предлагаемый подход применим для анализа тонкоплёночных и многослойных структур, где требуется точное определение химического состава и фазового состояния на нанометровых масштабах, а также для исследования процессов формирования оксидных слоёв в условиях различных режимов модификации поверхности.

Заслуживают внимания результаты работы по исследованию эволюции химического состава плёнок после многократного ионного облучения аргоном в различных режимах и последующего кратковременного атмосферного окисления. Выявлены режимные параметры, позволяющие целенаправленно и контролируемо изменять химический состав плёнок по глубине, что важно для их функционального применения. Данный результат представляет интерес как с точки зрения развития фундаментальных представлений о механизмах формирования оксидных структур, так и с позиции прогнозируемого управления химическим составом, от которого зависят ключевые физико-химические свойства плёнок.

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав и заключения. Объём составляет 152 страницы и включает в себя 57 рисунков и 7 таблиц. Список литературы включает 252 библиографическую ссылку.

Во **введении** сформулированы актуальность темы, степень её разработанности, цели и задачи работы, объект и предмет исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость диссертации, представлены положения, выносимые на защиту. Также приведена информация о публикациях

соискателя, личном вкладе автора в получение результатов, достоверности результатов работы и данные об их апробации.

Первая глава содержит обзор литературы, посвящённый исследованию, созданию и модификации металл-оксидных тонких плёнок, с особым вниманием к кислородно-ниобиевым системам, обладающим широким спектром стехиометрических и нестехиометрических фаз. Рассмотрены методы модификации и анализа поверхности таких плёнок, подчеркнута значимость формирования многослойных наноструктурированных плёнок с *in situ* контролем их химического состава, а также проанализированы возможности и ограничения рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии для послойного фазового анализа.

Вторая глава посвящена развитию метода послойного химического фазового анализа ультратонких плёнок на основе плоскопараллельной модели мишени. В рамках предложенного алгоритма решаются задачи вычитания фона многократно неупругорассеянных фотоэлектронов, деконволюции фотоэлектронных линий с учётом химического сдвига и расчёта толщин оксидных слоёв, что повышает точность интерпретации спектров. Установлено, что применение усовершенствованного метода фоновой коррекции, учёт упругого рассеяния и восстановление фазового профиля позволяют достичь субнанометровой точности при глубине зондирования до 10 нм.

Третья глава посвящена разработке метода послойного химического фазового анализа неоднородных плёнок с наноструктурированной поверхностью на основе рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением. Решена задача переноса фотоэлектронов через многослойную неоднородную мишень. Представлено моделирование фотоэлектронной эмиссии для мишеней с периодическими и стохастическими наноструктурами. Особое внимание уделено влиянию эффекта затенения поверхности на формирование функции фотоэлектронной эмиссии. Разработанный численный метод, верифицированный с помощью атомно-силовой микроскопии, обеспечивает высокоточное определение химического фазового состава плёнок по глубине с учётом их наноструктурированной поверхностной морфологии.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы, список публикаций автора по теме диссертации и цитируемой литературы.

Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне и затрагивает актуальные вопросы современной науки. Достоверность и значимость полученных результатов подтверждаются их апробацией в виде публикаций в авторитетных научных журналах, а также докладов на ведущих российских и международных конференциях.

Автореферат соответствует тексту диссертационной работы.

Научные положения, выводы и рекомендации, представленные в диссертации, логически выстроены и имеют достаточное теоретическое и экспериментальное обоснование. На основе проведённых исследований и опубликованных работ соискатель сформулировал ряд научных положений, отражающих новизну и научную ценность диссертационного исследования. В качестве основных достоинств работы можно выделить следующие:

- Предложен метод управляемого формирования наноструктурированных ультратонких металл-оксидных плёнок путём чередования различных режимов ионного облучения аргоном и атмосферного окисления при субнанометровом контроле состава, основанный на многоэтапном алгоритме химического анализа с использованием рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением, что позволяет целенаправленно изменять химический состав и структурные характеристики плёнок, обеспечивая их оптимизацию для применения в сенсорных, оптоэлектронных и мемристивных устройствах;
- Предложен расчёт функций фотоэлектронной эмиссии для мишеней с наноструктурированной поверхностью, позволяющий количественно оценить вклад неоднородности мишени в формирование фотоэлектронного спектра и обеспечивающий более точную интерпретацию рентгеновских фотоэлектронных спектров;
- При анализе режимов ионного воздействия на поверхность мишени предложены два подхода: один обеспечивает преимущественное распыление материала, а другой — целенаправленное изменение его химического состава без значительного изменения толщины слоя, что позволяет гибко управлять структурой плёнки и адаптировать её состав для различных функциональных применений.

В то же время к работе имеется ряд замечаний:

1. В работе при выполнении послойного химического фазового анализа, по сути, решается обратная задача спектроскопии, заключающаяся в восстановлении химического состава мишени по глубине на основе экспериментальных данных. Однако следует отметить, что найденные значения параметров, соответствующие экспериментальным данным, могут быть не единственными. В работе этот вопрос частично рассматривается, однако отсутствует детальное обсуждение возможной неоднозначности решения обратной задачи, а также систематизированное обоснование подходов к её устранению.
2. Предлагаемый метод послойного химического фазового анализа приведен для исследования неоднородных плёнок с наноразмерной шероховатостью. Однако в работе не указано, сохраняет ли данный метод достаточную чувствительность при анализе образцов с шероховатостью в микромасштабе или в случаях, когда границы слоёв имеют значительные неровности. Кроме того, на мой взгляд было бы полезно более подробно обсудить универсальность предлагаемого метода для разных структур.
3. В работе показано, что ионное воздействие проводилось в различных режимах на окисленные металлические плёнки с наноразмерной шероховатостью. Однако используемый подход к моделированию для расчёта коэффициентов распыления и глубины проникновения ионов аргона не учитывает наличие углеводородных загрязнений и нанорельефа поверхности, что является важным фактором в данном случае и может существенно повлиять на точность расчётов.
4. Следует отметить недостаточно аккуратное оформление подрисуночных подписей к некоторым рисункам, например, 1.11, 3.4, 3.10 и др. В этих случаях

подписи расположены на разных страницах с соответствующими рисунками, что затрудняет восприятие материала. Кроме того, в подрисуночной подписи к рис.1.11 отсутствует ссылка на соответствующую работу. В работе присутствует также определенное количество опечаток.

При этом указанные замечания не снижают ценности результатов диссертационной работы, заслуживающей высокой оценки.

Общее впечатление о диссертационной работе Д.С. Лукьянцева положительное. Считаю, что диссертация «Метод контролируемого формирования наноструктурированных металл-оксидных пленок» соответствует специальности 1.3.5. Физическая электроника, а также критериям, установленным Положением о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а её автор — Лукьянцев Денис Сергеевич — заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.5. Физическая электроника.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры нанoeлектроники Института перспективных технологий и индустриального программирования РТУ МИРЭА

Шерстюк Наталия Эдуардовна

Контактные данные:

тел.: +7 (499) 600-80-80 (доб. 23026) (рабоч.), +7 (916) 500-86-87 (моб.)

e-mail: sherstyuk@mirea.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена докторская диссертация:

05.27.01 — «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах»

Место работы:

119454, г. Москва, проспект Вернадского, д. 78

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет» (РТУ МИРЭА)

Телефон: +7 (499) 600-80-80; e-mail: mirea@mirea.ru