

Озыв официального оппонента  
на диссертационную работу Нигаард Рой Роевича «СИНТЕЗ И СТРУКТУРА  
ТОНКИХ ПЛЕНОК ГЕКСАГОНАЛЬНОГО LuFeO<sub>3</sub> И ГЕТЕРОСТРУКТУР  
НА ЕГО ОСНОВЕ», представленную на соискание учёной степени кандидата  
химических наук по специальности 02.00.21 (1.4.15) – химия твёрдого тела.

Как известно, тонкопленочные технологии находят широкое применение в самых различных областях твердофазного материаловедения, в первую очередь, в электронике и смежных отраслях, для защиты стекол, металлов, в сенсорном приборостроении, мембранно-каталитических процессах и др. Среди многообразия физических и химических приемов формирования покрытий в целом ряде случаев предпочтение имеют такие химические методы, как золь-гель, технология пленок Ленгмюра-Блоджетт, молекулярное наслаивание, химическое осаждение из газовой фазы (ХОГФ), темплатный синтез. Активно используется в процессах получения не только пленок, но и ультрадисперсных порошков, химическое осаждение из газовой фазы (или в зарубежной литературе процесс CVD – Chemical Vapor Deposition). Благодаря определенной универсальности, метод ХОГФ позволяет синтезировать не только однокомпонентные покрытия, но и формировать композиции сложного состава с градиентными и различными функциональными характеристиками.

Представленная диссертационная работа посвящена разработке методик синтеза методом ХОГФ слоистых эпитаксиальных гетероструктур на основе гексагонального феррита лютеция и оксида церия на монокристаллических подложках R-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, (111) YSZ, (100) YSZ (оксид циркония, стабилизированный оксидом иттрия), проведению их физико-химических исследований и оценке свойств полученных продуктов во взаимосвязи с особенностями их состава и строения.

**Актуальность работы.**

Выбранные объекты исследования относятся к материалам, получение которых позволяет сочетать в них сегнетоэлектрические и магнитные свойства. К таким веществам относится, в частности, гексагональный феррит лютеция h-LuFeO<sub>3</sub>. Учитывая термодинамическую нестабильность таких объемных материалов, получение их в виде тонких эпитаксиальных пленок позволяет повысить устойчивость подобных объектов. Таким образом, синтез тонкопленочных структур на основе h-LuFeO<sub>3</sub> на поверхности R-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, (111) YSZ, (100) YSZ в сочетании с буферным слоем CeO<sub>2</sub>, выявление структуры полученных продуктов и ее взаимосвязи с магнитно-сегнетоэлектрическими свойствами является обоснованным направлением исследований в рамках рассматриваемой диссертационной работы. Для решения синтетических задач выбран хорошо известный метод ХОГФ, в реализацию которого автор внес важнейший компонент – способ подачи паров твердого реагента в реакционный объем. На основании изложенного,

сформулированные в работе цели и задачи, предлагаемые подходы для их решения свидетельствуют об **актуальности** диссертационной работы.

### **Научная новизна результатов исследований.**

Оценивая научную новизну результатов проведенных исследований, следует отметить два основных направления в работе: во-первых, синтетическая часть и элементы ее новизны, а во-вторых, значительный объем экспериментальных данных по составу и структуре полученных соединений в сочетании с привлеченным молекулярно-механическим подходом к моделированию границы раздела пленка – подложка.

Несмотря на широко используемый метод ХОГФ для получения тонких пленок, в работе предложен новый способ точного дозирования подачи паров твердого реагента в реакционную камеру, который подробно изложен и проиллюстрирован экспериментально на примере синтеза пленок диоксида церия на выбранных подложках. Новизна указанного приема подтверждена патентом, соавтором которого является Нигаард Р.Р.

К основным новым научным результатам по созданию целевых продуктов можно отнести следующие: выявлены закономерности эпитаксиального роста пленок  $h\text{-LuFeO}_3$  в зависимости от симметрии поверхности подложки, доказано дестабилизирующее действие поверхности  $(111)\text{CeO}_2$  и, наоборот,  $(001)\text{CeO}_2$ , способствующее эпитаксиальному росту  $\text{LuFeO}_3$  в составе композиции  $\text{LuFeO}_3/\text{CeO}_2/\text{YSZ}$ . Важным научным достижением в работе является сочетание моделирования границы раздела фаз на основе молекулярно-механического подхода, что позволило автору прогнозировать на атомном уровне конфигурацию границы раздела пленка-подложка.

Таким образом, **научная новизна** проведенных исследований как в части синтетических приемов, так и в результатах по составу, структуре и свойствам полученных различных тонкопленочных структур, не вызывает сомнений.

### **Практическая значимость работы.**

Безусловно, к практической значимости работы относятся реально полученные экспериментальные данные, связанные с разработанным способом дозирования твердого прекурсора при подаче в реакционную камеру на примере синтеза пленок диоксида церия методом ХОГФ. К перспективным практически значимым данным следует отнести результаты по исследованию свойств тонкопленочных структур  $\text{LuFe}_2\text{O}_4/h\text{LuFeO}$  с точки зрения возможного применения их в качестве мультиферроиков.

В качестве положительных аспектов рассматриваемой диссертационной работы можно отметить достаточно четкий и обоснованный анализ литературы по тематике диссертации, что позволило автору четко сформулировать актуальность работы, цель и задачи для ее достижения. Следует также отметить надежность полученных данных по составу, структуре и свойствам сложных композитных пленок благодаря

использованию комплексного подхода к их исследованию с применением взаимодополняющих современных методов (АСМ, ЭМ, рентгеновская дифракция, микроскопия сегнетоэлектрического отклика, СКВИД-магнитометрия) в сочетании с моделированием границы раздела пленка-подложка.

Результаты проведенных исследований в достаточной степени отражены в соответствующих публикациях с учетом требований ВАК: в высокорейтинговых научных журналах и в полученном патенте.

По содержанию диссертационной работы имеется ряд вопросов и пожеланий.

1. Несмотря, в целом, на достаточно хорошо написанный литературный обзор, следует отметить, что автор не полностью отразил известные методы получения тонких пленок, которые успешно конкурируют с ХОГФ. Например, золь-гель процесс, темплатный синтез, метод молекулярного наслаивания, известный за рубежом как атомно-слоевое осаждение (Atomic Layer Deposition – ALD),.

2. Не полностью отражен синтез и характеристики получаемых пленок: какой размер подложек, точность регулирования толщины нанопокрyтия, его равномерность, сплошность, адгезия к поверхности подложки.

3. Позволяет ли запатентованный метод дозирования твердофазных реагентов осуществлять в едином цикле последовательную обработку различными прекурсорами?

4. Следует отметить не полное отражение практической значимости полученных в работе результатов. Автор сконцентрирован лишь на способе дозирования реагента при реализации процесса ХОГФ. Но практический интерес, с точки зрения возможности получения пленочных мультиферроиков с заданными характеристиками, представляют результаты по составу, структуре и возможности осуществления эпитаксиального роста пленок на основе  $h\text{-LuFeO}_3$  на поверхности R-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, (111) YSZ, (100) YSZ в сочетании с буферным слоем CeO<sub>2</sub>. Следует также отметить и успешное сочетание эксперимента и моделирования, что позволит прогнозировать характеристики интерфейса пленка-подложка.

5. В соответствии с новой номенклатурой научных специальностей, для специальности «химия твердого тела» вместо номера 02.00.21 присвоен номер 1.4.15. На титуле автореферата и диссертации вставлен старый номер указанной научной специальности.

Отмеченное не влияет на положительное мнение о результатах, полученных соискателем при выполнении исследований, и о работе в целом.

Считаю, что диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М. В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 02.00.21 (1.4.15) – «Химия твердого тела» (по химическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете

имени М. В. Ломоносова, а также оформлена согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.

На основании изложенного считаю, что соискатель Нигаард Рой Роевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата химических наук по специальности 02.00.21 (1.4.15) – «Химия твердого тела».

Заведующий кафедрой химической нанотехнологии и материалов электронной техники ФГБОУ «Санкт – Петербургский государственный технологический институт (технический университет)» доктор химических наук профессор

А.А. Малыгин

06.06.2022.

malygin@lti-gti.ru  
тел 8(812) 494-92-39  
адрес 190013,  
Санкт-Петербург,  
Московский пр., д. 26,  
СПбГТИ(ТУ)

Подпись Малыгина А.А. И.А. Маликов  
Начальник отдела кадров И.А. Маликов

