

## ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации на соискание ученой степени кандидата химических наук Нигаарда Рой Роевича на тему: «Синтез и структура тонких пленок гексагонального  $\text{LuFeO}_3$  и гетероструктур на его основе»

по специальности 02.00.21 – «Химия твердого тела»

В последние годы ведется интенсивный поиск веществ с полифункциональными свойствами. К таким веществам относятся и мультиферроики, в которых сочетаются сегнетоэлектрические и магнитные свойства. Найденные к настоящему времени однофазные мультиферроики обладают малыми величинами поляризации и намагниченности. Композитные двухфазные мультиферроики имеют существенно больше величины поляризации и намагниченности. Наибольшие величины магнитоэлектрической связи обнаружены у тонкопленочных композитах-мультиферроиках. Настоящая работа посвящена исследованию эпитаксиальных гетероструктур с участием тонких пленок гексагонального феррита лютеция. Создание таких полифункциональных композитов является актуальным.

Диссертационная работа Нигаарда Р. Р. посвящена газофазному синтезу слоистых эпитаксиальных гетероструктур с участием тонких пленок гексагонального феррита лютеция. В работе большое внимание уделяется выявлению взаимосвязей свойств гетероструктур в зависимости от ориентации и микроструктурных особенностей пленок.

Общий объем работы составляет 147 страниц, включая 95 рисунков и 4 таблицы. Список цитируемой литературы состоит из 132 наименований. В диссертации имеются следующие разделы: введение, обзор литературы, экспериментальная часть, обсуждение результатов, выводы и список использованной литературы. В литературном обзоре приведены данные о строении исследуемых соединений ( $\text{LuFeO}_3$ ,  $\text{LuFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) и их

модификациях. В обзоре имеются данные о мультиферроиках  $h\text{-LuFeO}_3$ . В общем, в литературном обзоре имеются все необходимые данные для введения читателя в проблему получения мультиферроиков.

В экспериментальной части (глава 3) приведены данные по получению тонких пленок. Подробно описаны методы исследования пленок (дифракция, микроскопия, силовая микроскопия, микроскопия сегнетоэлектрического отклика, СКВИД - магнитометрия). Предложенные методы исследования пленок позволили получить надежные экспериментальные результаты. Четвертая глава диссертации посвящена обсуждению полученных экспериментальных результатов.

В ходе выполнения работы автором разработана новая методика синтеза тонкопленочных оксидных гетероструктур с вертикальным градиентом химического состава, базирующаяся на применении запатентованного устройства подачи летучих прекурсоров в реакторы MOCVD. С использованием разработанной методики получены и исследованы тонкопленочные структуры  $h\text{-LuFeO}_3$  на монокристаллических подложках YSZ(111) и YSZ(001). На монокристаллических подложках YSZ(111) и YSZ(001),  $R\text{-Al}_2\text{O}_3$  впервые получены и исследованы тонкие пленки. Установлено, что релаксация напряжений в пленках на  $\text{CeO}_2$  связана с образованием дислокаций несоответствия на границе с подложкой. Установлено, что формирование структуры  $h\text{-LuFeO}_3$  зависит от поверхности флюоритных подложек  $\text{CeO}_2$  и YSZ. На поверхности (001) формируется бивариантная структура, а на (111) поверхности моновариантная. Показано, что сегнетоэлектрический отклик поверхности бивариантной структуры  $h\text{-LuFeO}_3$  вдвое выше, чем сегнетоэлектрический отклик поверхности моновариантной структуры, что связано с размером сегнетоэлектрического домена. Впервые получены тонкопленочные мультиферроидные композиты с эпитаксиальным контактом  $\text{LuFe}_2\text{O}_4/h\text{-LuFeO}_3$ , содержащие нановключения магнетита и вюстита. Установлено, что в магнитных свойствах таких гетероструктур наблюдаются эффекты, свидетельствующие об



обменном взаимодействии на границе ферромагнитной фазы и спинового стекла.

Выполненное исследование имеет практическое значение т.к. в нем разработана новая методика синтеза тонкопленочных гетероструктур и структур с вертикальным градиентом химического состава без прерывания хода осаждения. Предложенная методика осуществляется с помощью разработанного нового устройства для подачи летучих прекурсоров в системы MOCVD, защищенного патентом РФ.

Подводя итог сказанному, следует отметить высокий экспериментальный и научный уровень работы. В итоге работы дополнен ряд тонкопленочных мультиферроидных материалов несколькими новыми представителями путем легирования пленок  $h\text{-LuFeO}_3$  и создания их композиций (гетероструктур) со слоями, имеющими более высокий магнитный момент. В работе приведены новые экспериментальные данные по получению тонких пленок гексагонального  $\text{LuFeO}_3$  и гетероструктур на его основе, которые не вызывают сомнений. Все исследования проведены с применением современных методов анализа. Все экспериментальные данные обсуждаются с привлечением разных областей знаний и не противоречат общепринятым представлениям химии твердого тела. Выводы работы вполне обоснованы. Работа грамотно написана и оформлена. Автореферат отражает основное содержание диссертационной работы, актуальность темы, ее теоретическую и практическую значимость.

Однако, по работе можно сделать следующие замечания:

1. На стр. 43 описана модель расположения атомов в пограничном слое  $\text{Fe}_3\text{O}_4/h\text{-LuFeO}_3$ . Из текста диссертации не понятно на базе каких экспериментальных данных предложена обсуждаемая модель.
2. Наличие сегнетоэлектричества в синтезированных пленках доказано методом атомно-силовой микроскопии, который показывает распределение сегнетоэлектрических доменов. Можно ли прямым методом (наличие сегнетоэлектрической петли гистерезиса или

диэлектрическими измерениями) доказать наличие сегнетоэлектричества в исследуемых пленках

3. В диссертации отсутствует расшифровка сокращений, например YSZ.
4. Стр. 107 пропущена буква «в» в фразе «Следует отметить, что случае образца, полученного на подложке YSZ(001).....»

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 02.00.01 – «неорганическая химия» (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.

Таким образом, соискатель Нигаард Рой Роевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата химических наук по специальности 02.00.01 – «неорганическая химия».

Официальный оппонент:

доктор химических наук,

профессор кафедры химической технологии и новых материалов.

Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Лазорьяк Богдан Иосипович



Контактные данные:

тел.: +7(495)939-21-38, e-mail: bilazoryak@gmail.com



Специальность, по которой официальным оппонентом  
защищена диссертация:

02.00.01 – Неорганическая химия (хим. науки)

Адрес места работы:

119991, Москва, Ленинские горы, д.1 стр. 11

Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования  
«Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Тел.: +7(495)939-21-38, e-mail: bilazoryak@gmail.com

Подпись сотрудника Химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова  
Лазоряка Б.И. удостоверяю: