

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук, доцента Спивак Юлии Михайловны на диссертацию Игнатъевой Ирины Олеговны **«Получение и исследование пленок оксида цинка, модифицированного оксидами меди, кобальта, никеля или алюминия»**, представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.2.3. Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники

Актуальность темы диссертации

Развитие полупроводниковой электроники ставит перед учеными задачи по разработке перспективных технологий получения материалов с заданными свойствами. Особую актуальность имеют способы получения пленочных наноматериалов, так как на их основе можно получать миниатюрные изделия электронной техники с хорошими функциональными свойствами. В рецензируемой работе предлагается использовать окислительный пиролиз для получения пленок модифицированного оксида цинка, который хорошо зарекомендовал себя при формировании пленок чистого ZnO и композитов, например, SnO₂-ZnO. Для практической реализации и получения перспективных материалов необходимо модифицирование оксидами других металлов, чему и посвящена диссертация. Поэтому актуальность темы не вызывает сомнений.

Степень обоснованности научных положений

Анализ диссертации показал, что основные научные положения и выводы, сделанные Игнатъевой И.О., теоретически и экспериментально обоснованы. Обоснованность полученных в работе результатов основывается на правильной формулировке задач; тщательном теоретическом изучении проблемы; экспериментах, проведенных с применением известных методик и современных методов диагностики, включая электронную микроскопию, дифференциальную сканирующую калориметрию, термогравиметрический анализ и др. Структурно-морфологические исследования полученных пленок и их состав проведены с использованием рентгенофазового анализа, сканирующей электронной микроскопии, просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения, энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. Важно, что полученные результаты подтвердились

несколькими независимыми методами, например, размеры нанокристаллитов пленок определены ПЭМ, СЭМ, РФА.

Научная новизна и достоверность результатов

В диссертационной работе получен ряд новых научных результатов, позволивших разработать технологические основы создания тонких пленок $ZnO-M_xO_y$, где $M = Al, Co, Ni, Cu$. К наиболее значимым научным результатам, полученным впервые, относятся:

1. Разработаны технологические основы получения тонких прозрачных пленок M_xO_y , где $M = Al, Co, Ni, Cu$ (добавка – 1–10 мол.%), сформированных кристаллитами размером 18–42 нм, с использованием окислительного пиролиза абиеатов металлов на твердых подложках. Доказан выбор 1,4-диоксана в качестве растворителя промежуточного продукта синтеза и температуры формирования пленочных материалов – 600 °С.

2. Установлены закономерности влияния концентрации модифицирующих добавок разной химической природы (M_xO_y , где $M = Al, Co, Ni, Cu$), а также температуры термической обработки на физико-химические и функциональные свойства пленок $ZnO-M_xO_y$, сформированных окислительным пиролизом абиеатов металлов.

3. Установлена возможность создания сенсоров диоксида азота резистивного типа на основе синтезированных пленок $99ZnO-1Co_3O_4$, $95ZnO-5NiO$, $99ZnO-1CuO$, полученных разработанным способом синтеза, с пределом обнаружения диоксида азота до 0,77 ppm.

Научная новизна представленных результатов диссертационной работы не вызывает сомнений, а предлагаемая технология перспективна для получения пленок оксидов металлов.

Достоверность полученных результатов подтверждается согласованностью с результатами исследований других авторов и с известными научными теориями в области оксидных полупроводников; соответствием теории прикладным результатам диссертации; использованием современных методов и оборудования для экспериментов; эффективностью метода при его применении в производственной деятельности предприятия и выполнении заданий Передовой инженерной школы.

Практическая значимость

Предлагаемый в рецензируемой работе способ получения позволяет получать сплошные прозрачные пленки M_xO_y , где $M = Al, Co, Ni, Cu$ толщиной 150–200 нм, сформированные нанокристаллитами оксидов металлов, размер которых составляет 18–42 нм, обладающие высокой пропускающей

способностью в диапазоне 400–1000 нм и хорошими функциональными свойствами, представляющими интерес для приборов электронной техники, например, газочувствительных датчиков, фотоэлектрических устройств.

Определены составы тонких пленок, обладающих наилучшими функциональными свойствами: пропускающей способностью (95ZnO–5Al, коэффициент пропускания – более 99 % в диапазоне 400–1000 нм), фоточувствительными свойствами (90ZnO–10CuO, время отклика – 10 с при воздействии излучения с длиной волны 400 нм), газочувствительностью (95ZnO–5NiO по отношению к NO₂ с концентрациями 7,7 и 3,85 ppm и 99ZnO–1Co₃O₄ по отношению к NO₂ с концентрацией 0,77 ppm), что позволяет определять содержание диоксида азота на уровне ПДК в воздухе рабочей зоны.

Значимость для науки и производства полученных результатов

Теоретическая значимость работы заключается в выявлении зависимостей «состав – структура – свойства» для пленочных материалов на основе ZnO, полученных окислительным пиролизом; получении данных о влиянии добавок (M_xO_y, где M = Al, Co, Ni, Cu) на оптические, электрофизические, фото- и газочувствительные свойства пленок.

Общая характеристика работы

Диссертационная работа Игнатъевой Ирины Олеговны на тему «Получение и исследование пленок оксида цинка, модифицированного оксидами меди, кобальта, никеля или алюминия», представленная к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности специальности 2.2.3. «Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники», является самостоятельным законченным научно-квалификационным исследованием и соответствует паспорту специальности. Работа носит экспериментальный характер.

В диссертационной работе Игнатъевой И. О. соблюдены принципы соответствия задач исследования и поставленной цели, задач исследования и полученных результатов, содержания диссертации и опубликованных работ.

Диссертация объемом 177 страниц состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и трех приложений. Библиографический список включает 202 наименования. Материал изложен последовательно и логично, диссертация написана грамотным научно-техническим языком. Диссертация выполнена на достаточно высоком научном уровне, все поставленные в работе задачи выполнены. В диссертации и автореферате в полной мере представлены необходимые результаты для

изучения и ознакомления с работой. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Полнота опубликования основных результатов работы в научной печати и соответствие автореферата диссертации

Основные научные результаты опубликованы в 16 научных работах, в том числе в пяти статьях в журналах, индексируемых в наукометрической базе Scopus. Получен один объект ноу-хау. Автореферат отражает основные научные положения диссертации.

Замечания по диссертационной работе

1. В работе были использованы несколько типов подложек для нанесения исследуемых пленок (два типа стекол, монокристаллический кремний, никель и др.), но остается неясным, влияли ли и как природа и морфология подложек на морфологию, микроструктуру и свойства полученных пленок.

2. В работе получены интересные результаты по свойствам газочувствительности модифицированных добавками пленок оксида цинка в отношении NO_2 , но из текста диссертации остается не до конца ясным проводилась ли оценка влияния водяных паров или наличия других газов в тестовой пробе? Какие подложки для данных измерений были использованы? Сколько циклов измерений газочувствительности делалось для одного образца?

3. Не для всех пленок проведены исследования просвечивающей электронной микроскопией высокого разрешения. Изучение функциональных свойств также проведено избирательно. Например, газочувствительные свойства определены для ZnO-NiO , $\text{ZnO-Co}_3\text{O}_4$ и ZnO-CuO , а для пленок ZnO , модифицированных Al(III) , эти исследования не приведены. Фоточувствительные свойства изучены для пленок всех составов, кроме $\text{ZnO-Co}_3\text{O}_4$, почему?

4. Рисунок 60 г, е (стр. 131), показывающий результаты EDX анализа по содержанию кислорода и меди в пленке, нечеткий и не позволяет определить достоверность сделанного диссертантом вывода о количественном составе пленки.

5. В работе имеются некоторые опечатки и есть замечания по оформлению графиков. Например, шкалы сопротивлений пленок представлены в ненадлежащем виде (рис. 29 на стр. 93, рис. 72 стр. 147) и пр.

Указанные замечания и неточности не снижают общей ценности диссертационной работы и не влияют на основные выводы и защищаемые положения работы.

Заключение

Диссертация Игнатъевой И.О. по теме «Получение и исследование пленок оксида цинка, модифицированного оксидами меди, кобальта, никеля или алюминия» является законченной научно-квалификационной работой. Она соответствует пунктам 1 и 2 паспорта специальности 2.2.3. «Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники» («1. Разработка физико-технологических и физико-химических основ создания новых и совершенствования существующих материалов включая полупроводники, диэлектрики, проводники, технологические среды», «2. Физические и физико-химические исследования технологических процессов и маршрутов производства материалов и приборов электронной техники, разработка их физико-технологических и физико-химических моделей»), а также критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южный федеральный университет». Автор диссертации Игнатъева И.О. заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.2.3 «Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники».

Официальный оппонент, доцент кафедры микро- и нанoeлектроники федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина),

доктор технических наук, доцент

Спивак Юлия Михайловна

«11» августа 2025 г.



ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ
ЧАЛЬНИК ОДС
Л. РУСЯЕВА

197022, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5, литера Ф

Спивак Юлия Михайловна, доктор технических наук (05.27.06 – Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники), доцент, доцент кафедры микро- и нанoeлектроники. Телефон: +7 812 234-31-64, Адрес электронной почты: ymспивак@etu.ru

подпись

дата

Подпись доктора технических наук, доцента кафедры микро- и нанoeлектроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ» Спивак Юлии Михайловны верна.