

## О Т З Ы В

официального оппонента

на диссертационную работу **Евстафьевой Марии Васильевны**

«Перспективные материалы на основе наностержней оксида цинка: газофазный синтез, легирование и УФ сенсорные свойства», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах

Диссертационная работа Евстафьевой Марии Васильевны посвящена получению и исследованию новых материалов на основе наностержней оксида цинка, в том числе композиционных структур ZnO/MgO типа «ядро-оболочка». Материалы на основе наностержней оксида цинка считаются одними из наиболее перспективных полупроводниковых материалов в связи с широкими возможностями применения в оптоэлектронике, пьезоэлектрической и сенсорной технике. Для создания новых поколений устройств на основе ZnO нужны высококачественные наноструктуры определённой формы с низким уровнем дефектов. Поэтому рецензируемая работа представляется современной и актуальной.

Диссертация М.В.Евстафьевой состоит из введения, пяти глав, заключения и списка используемой литературы из 114 наименований. Общий объем диссертации 118 страниц, включая 62 рисунка.

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, четко сформулированы цели и задачи работы, методы и объекты исследования, изложено ее содержание, показаны научная новизна и практическая ценность, приведены положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлен обзор научных работ, посвящённых свойствам, методам получения и легирования оксида цинка. Отдельно рассмотрено влияние УФ облучения на электропроводность ZnO и описаны

примеры применения наностержней оксида цинка в качестве чувствительного элемента УФ сенсоров.

**Во второй главе** дано описание экспериментальных методов получения, легирования и анализа исследуемых в работе наностержней и плёнок оксида цинка. Для синтеза и легирования в работе использовали установку химического газофазного осаждения с двухзонным кварцевым реактором проточного типа. Следует отметить, что для характеристики и исследования полученных материалов привлечено большое число современных методов, таких как электронная микроскопия, фото- и катодолюминесценция, КР спектроскопия, рентгеноструктурный анализ и др. Описана методика измерения сенсорных характеристик массивов наностержней ZnO.

**В третьей главе** приведены результаты исследований влияния условий синтеза на форму наностержней оксида цинка при самокаталитическом газофазном синтезе из элементов. В настоящей работе впервые продемонстрированы возможности целенаправленного управления формой растущих нанокристаллов. Установлено, что скорость роста наностержней ZnO определяется соотношением расходов цинка и кислорода. Исследования полученных нанопроволок ZnO с помощью методов электронной микроскопии, фото- и катодолюминесценции, рентгеновской дифракции и химического анализа показали, что они являются высокочистыми монокристаллами с малым содержанием дефектов и хорошим стехиометрическим составом.

Заслуживает интереса новый способ получения текстурированных плёнок за счёт латерального роста наностержней ZnO в один этап. Большим преимуществом метода является то, что пленки могут быть выращены на различных подложках, в том числе, на стеклянных. Установлено, что плёнки, полученные данным методом, демонстрируют высокие значения электропроводности, характерные для легированных плёнок ZnO. Анализ совокупности экспериментальных результатов дает основание полагать, что

основным фактором, приводящим к росту электропроводности, является избыточный цинк, что подтверждается соотношением электропроводности и нормированной полосы ( $I_n$ ) при  $150,5 \text{ см}^{-1}$  в КР спектре.

**В четвёртой главе** были проведены исследования по получению гибридных материалов на основе ZnO и MgO, в результате которых получены интересные и практически важные результаты. Для легирования оксида цинка магнием использовали два метода. Первый метод заключается в обработке ранее синтезированных массивов наностержней парами магния. Показано, что последующий отжиг массивов наностержней на воздухе при  $550^\circ\text{C}$  приводит к образованию иерархических нанопроволочных структур MgO/ZnO. Во втором случае образцы получали с использованием разработанного метода газофазного синтеза при совместном испарении металлических цинка и магния. В результате были получены композитные структуры типа ядро-оболочка ZnO-MgO, что подтверждается данными рентгеновской дифракции, КР спектроскопии и катодолюминесценции.

**Пятая глава** посвящена исследованию основных сенсорных характеристик наностержней оксида цинка. Продемонстрированы сенсорные структуры как на одиночных наностержнях, так и на массивах ZnO. Изучены основные параметры наноструктур ZnO для использования их в качестве чувствительного элемента УФ сенсора. Проведено сравнение сенсорных характеристик плёнок и массивов наностержней ZnO. Показано, что массивы наностержней ZnO обладают существенными преимуществами (большая чувствительность, малое время отклика и восстановления) по сравнению с пленками при использовании в качестве УФ сенсоров.

Исследовано влияние отжига и воздействия влажной атмосферы на УФ сенсорные характеристики исследуемых структур. Главным итогом данного раздела является убедительное доказательство применимости массивов наностержней ZnO для создания надежных, дешевых и простых в изготовлении сенсоров УФ излучения.

И, наконец, в разделе **выводы** суммированы результаты проведенных исследований.

По тексту диссертации имеется несколько замечаний:

1. При рассмотрении механизма роста наностержней ZnO автор перечисляет большое число факторов, влияющих на характер роста. В связи с этим возникает вопрос, насколько воспроизводимой является представленная методика.

2. Из текста диссертации не совсем понятен механизм вторичного образования тонких нанопроволок на поверхности наностержней ZnO при их обработке в парах магния.

3. В настоящее время разработано большое число УФ сенсоров. Автору следовало бы более подробно обсудить, преимущества и недостатки предложенного УФ чувствительного материала.

В целом, диссертационная работа Евстафьевой М.В. отличается большим объёмом исследованного материала, написана понятным языком, текст сопровождается большим количеством таблиц и рисунков, и позволяет сделать вывод о том, что поставленные цели и задачи решены на высоком уровне с использованием современного оборудования, а полученные результаты являются новыми и представляют интерес, как в научном, так и в практическом плане.

Автореферат диссертации полностью соответствует основным положениям, изложенным в диссертации. Материалы исследований освещены в реферируемых журналах и доложены на конференциях, что подтверждает их достоверность.

Несмотря на замечания, можно дать высокую оценку диссертации по актуальности выбранной темы, объёму проведенных исследований, их новизне и уровню поставленных и решенных научных задач. Результаты диссертации представляют несомненный интерес для многих специалистов, работающих в этой области.

Диссертация и автореферат Евстафьевой М. В. «Перспективные материалы на основе наностержней оксида цинка: газофазный синтез, легирование и УФ сенсорные свойства» удовлетворяют требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а также паспорту специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах, по пункту 1, а ее автор, Евстафьева Мария Васильевна, безусловно, заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности по специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Официальный оппонент

Бородин Алексей Владимирович,  
доктор техн. наук, зам. директора по научной работе,  
начальник отдела технологий роста кристаллов и  
новых материалов ФГУП Экспериментальный завод  
научного приборостроения со Специальным  
конструкторским бюро РАН



Бородин А. В.

Подпись Бородина Алексея Владимировича заверяю:

Начальник отдела кадров ФГУП ЭЗАН  Косенкова Т. В.  
27.03.2017

Адрес: ФГУП ЭЗАН Московская область, 141432, г. Черноголовка, проспект  
Академика Семенова, д. 9  
Телефон: 8 (49652) 7-35-92  
e-mail: borodin@ezan.ac.ru

