

03.05.2018 № 10341-212/101

### УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки Института  
аналитического приборостроения  
Российской академии наук (ИАП РАН)  
доктор технических наук, профессор

  
Курочкин В.Е.  
« 2 » мая 2018 г.

### ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Е.В. Борисова  
«Оптические свойства легированных эпитаксиальных слоев нитрида галлия и  
выращенных методом магнетронного распыления оксидов цинка и меди»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических  
наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

#### 1. Актуальность темы работы

В диссертационной работе Е.В. Борисова исследуются оптические свойства кристаллов нитрида галлия, выращенных из газовой фазы, и оксидов цинка и меди, сформированных методом высокочастотного магнетронного распыления. На основе этих исследований прослежена связь между оптическими свойствами кристалла GaN и изменениями, происходящими в его электронном спектре при повышении концентрации донорной примеси, дана характеристика оптическими методами качества кристаллической решетки этих веществ в зависимости от условий роста.

Нитрид галлия в настоящее время является очень важным в практическом отношении полупроводниковым кристаллом, работы по наноструктурам на его основе занимают большое место в научной периодике. Оксид цинка также является популярным объектом академических и прикладных исследований, в частности, на его основе удается получать высококачественные системы нитевидных нанокристаллов. Что касается окиси меди, то интерес к ней в значительной степени продиктован уникальными свойствами ее экситонного спектра, в том числе и обнаруженными совсем недавно. В последнее время оксиды меди и цинка рассматриваются как перспективные материалы для применения в солнечных элементах, так что определение качества тонких кристаллических слоев этих материалов, получаемых магнетронным способом, представляет интерес. Таким образом, проведенные в диссертационной работе исследования вполне актуальны.

## **2. Оценка содержания диссертационной работы**

В первой главе диссертации рассмотрены спектры комбинационного рассеяния света применительно к кристаллам со структурой типа вюрцита, к которым относятся нитрид галлия и окись цинка, а также плазменные колебания и плазмон-фононное взаимодействие, которое в дальнейшем исследуется в легированных кристаллах GaN.

Во второй главе работы приведены сведения об экспериментальной технике, в частности, подробно описаны рамановские спектрометры. В этой же главе обсуждается технология роста легированных кремнием эпитаксиальных слоев GaN микронной толщины и не легированных намеренно кристаллов GaN толщиной в несколько миллиметров.

В третьей главе изучаются спектры люминесценции, отражения и комбинационного рассеяния тонких эпитаксиальных слоев нитрида галлия. Важным моментом этих исследований является использование набора образцов с различными концентрациями кремния – это позволило проследить за изменениями оптических свойств нитрида галлия в интервале концентраций донорной примеси от  $10^{16} \text{ см}^{-3}$  до значений, превышающих  $10^{19} \text{ см}^{-3}$ .

В четвертой главе исследованы оптические спектры объемного кристалла нитрида галлия, выращенного газофазным методом с применением хлора и имеющего форму цилиндра с диаметром 52 миллиметра и высотой 5 миллиметров. Такой кристалл можно использовать практически, поэтому представляло интерес исследовать его качество и степень однородности.

В пятой и шестой главах диссертации исследуются оптические свойства кристаллических пленок  $\text{ZnO}/\text{SiO}_2/\text{ZnO}$  большой площади, выращенных методом



высокочастотного магнетронного распыления на подложках из кремния и кварцевого стекла. Целью этих технологических экспериментов является получение пленок достаточно высокого качества для применения их в солнечных элементах. В работе проведена характеристика таких пленок методами спектроскопии комбинационного рассеяния, люминесценции и отражения.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

### **3. Научная новизна результатов работы**

Впервые изучено изменение спектров фотолюминесценции GaN при увеличении уровня легирования донорной примесью от  $10^{16}$  до  $5 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup> для серии образцов эпитаксиальных слоев нитрида галлия, выращенных методом металлоорганической газофазной эпитаксии, с широким диапазоном концентрации кремния. Полученные данные были сопоставлены с данными электрофизических измерений (ВАХ).

По спектрам комбинационного рассеяния света в эпитаксиальных слоях нитрида галлия с различными уровнями легирования кремнием были определены концентрации свободных носителей. Также было проведено сопоставление результатов с данными, полученными электрофизическими методами и из спектров решеточного отражения, показана хорошая согласованность этих данных.

Впервые проведена характеристика оптическими методами различных областей объемного кристалла нитрида галлия, выращенного из газовой фазы.

На основе исследования оптических спектров пленок оксидов цинка и меди, полученных методом магнетронного распыления, определены оптимальных условия для получения кристаллических слоев высокого качества.

### **4. Обоснованность и достоверность научных положений и выводов**

Обоснованность и достоверность научных положений, результатов и выводов диссертационной работы Е. В. Борисова определяется их хорошим согласием с известными экспериментальными и теоретическими данными, уже полученными другими авторами. Приведенные в работе экспериментальные результаты и выводы неоднократно представлялись на конференциях и опубликованы в рецензируемых научных изданиях.

### **5. Рекомендации по практическому использованию результатов и выводов диссертации**

Полученные в диссертации результаты расширяют существующие представления об оптических свойствах кристаллических слоев нитрида галлия – не легированных

намеренно и легированных кремнием в широком интервале концентраций донорной примеси кремния. В работе представлены важные для практики данные о соотношении оптических и электрофизических свойств исследованных кристаллов. Оптическая характеристика полученных методом магнетронного распыления кристаллических пленок оксидов меди и цинка показывает, что их качество позволяет рассматривать их как перспективный материал для практического применения в области солнечной энергетики. Используемый метод выращивания оксидных пленок позволяет значительно сократить затраты на их производство при оптимально подобранных параметрах.

Результаты диссертации могут быть использованы на предприятиях, связанных с изготовлением различного рода датчиков, устройств солнечной энергетики и нанокompозитных материалов, в научных лабораториях соответствующего профиля и учебных организациях, осуществляющих подготовку специалистов в области физики конденсированных сред, физического материаловедения, эпитаксиальных технологий. В частности, в АО «НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха», ООО «Коннектор Оптикс», ОАО «Авангард», ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Санкт-Петербургский Академический университет РАН и др.

## **6. Замечания.**

1. В диссертации отсутствует удовлетворительное объяснение причин уширения и смещения максимумов в зарегистрированных спектрах фотолюминесценции эпитаксиальных слоёв нитрида галлия при увеличении концентрации кремния.

2. Остался не освещенным вопрос, возможна ли количественная оценка качества исследуемых слоев предложенными в диссертации методами, или возможна только их качественная характеристика.

## **7. Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней.**

Указанные выше замечания не снижают общую положительную оценку диссертации. Она является законченной научно-исследовательской работой, выполненной на высоком профессиональном уровне. Следует отметить большой объем проведенных исследований и тщательное оформление диссертации и автореферата.

На основании изложенного считаем, что рассматриваемая диссертационная работа удовлетворяет требованиям пункта 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. (ред. от 28.08.2017), предъявляемым к кандидатским диссертациям, ее автор - Борисов Евгений



