

УДК 621:382

И.С. Романов, А.А. Мармалюк, А.В. Войцеховский, А.П. Коханенко

## Светодиодные структуры InGaN/GaN, изготовленные методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений

Проведены исследования светодиодных структур InGaN/GaN двух различных дизайнов: классического с 5 квантовыми ямами в качестве активной области и с добавлением слоя AlGaIn, с различными конфигурациями активных областей. Показано влияние слоя AlGaIn на люминесцентные характеристики структур.

**Ключевые слова:** светодиод, нитрид галлия, квантовая яма.

Сегодня большое внимание уделяется поиску альтернативных эффективных источников света, способных заменить существующие лампы накаливания. За последние несколько лет промышленное производство синих и белых светодиодов на основе гетероструктуры InGaN/GaN стало важным сегментом рынка полупроводниковых приборов. Немалую роль в этом сыграло наличие уникальных физических свойств нитрида галлия и гетеропары InGaN/GaN, из которой изготавливают активную область светодиодов синего свечения [1].

Типичные современные коммерческие светодиоды белого свечения состоят из полупроводникового элемента, излучающего свет в синем диапазоне длин волн, и одного или нескольких люминофоров. Светодиоды синего свечения содержат в качестве активной области от одной до десяти квантовых ям InGaN в матрице GaN [2]. Люминофор выступает в роли преобразователя синего излучения в белое. Для возможности использования светодиодов в качестве основного источника освещения необходимо повышать их эффективность. Этого можно добиться несколькими способами. В данной работе сообщается об исследованиях, направленных на создание высокоэффективных светодиодов синего свечения.

**Образцы и методики измерений.** Объектом исследования являлись светодиодные гетероструктуры InGaN/(Al)GaIn, выращенные методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений на установке AIX 2400G3 HT с горизонтальным реактором планетарного типа. Рост структур проводился на сапфировых подложках Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с ориентацией (0001). Температура роста варьировалась в пределах 750...1050 °С. Гетероструктуры состояли из зародышевого и буферного слоев GaN общей толщиной 1 мкм, слоя n-GaN толщиной 2 мкм, активной области из 5 квантовых ям InGaN/GaN толщиной 1,5...3 нм. В образцах I группы далее формировался барьерный слой p-AlGaIn, а в образцах II группы указанный слой отсутствовал. Все гетероструктуры завершались контактными слоями p-GaN толщиной 100...130 нм.

Процесс роста контролировался *in situ* при помощи системы LayTec EpiCurve-TT. Контроль светодиодных структур осуществлялся методами фотолюминесценции (ФЛ) и электролюминесценции (ЭЛ). Измерения спектров ФЛ и ЭЛ проводились на автоматизированной установке RPM Sigma при комнатной температуре. ФЛ возбуждалась лазером с длиной волны излучения 266 нм. Для измерения спектров ЭЛ в образцы вжигались точечные индиевые контакты. Также были проведены измерения ФЛ образцов в широком диапазоне температур от 5 до 300 К. Установка состояла из HeCd-лазера мощностью 5 мВт (на образце) с длиной волны излучения 325 нм и монохроматора СДЛ-1 с фотоэлектронным множителем ФЭУ-79.

**Результаты экспериментальных исследований.** На рис. 1 представлен спектр ФЛ одной из полученных светодиодных структур. Для спектров ФЛ характерно наличие основного пика, связанного с излучением квантовой ямы InGaN на длине волны 454,8 нм, и менее интенсивной полосы в диапазоне 550...650 нм, которую связывают с люминесценцией на глубоких примесных уровнях. Пик на длине волны 532 нм связан с возбуждающим лазером.

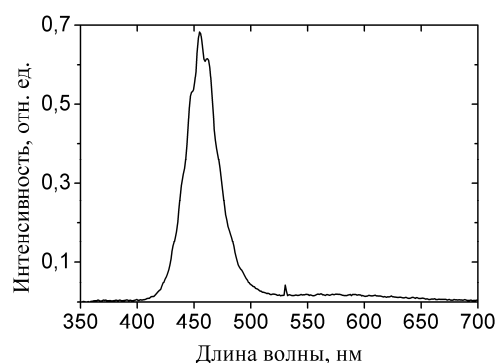


Рис. 1. Типичный спектр фотолюминесценции светодиодного образца

На рис. 2 приведены спектры ФЛ и ЭЛ при токе 30 мА для одного образца. Отличие спектров ФЛ и ЭЛ связано с различными механизмами возбуждения люминесценции. В случае ЭЛ при приложении напряжения изменяется профиль зон из-за эффекта Штарка, что приводит к сдвигу длины волны излучения. Для образцов I группы сдвиг основной длины волны излучения при разных механизмах люминесценции составлял 10...15 нм, тогда как для образцов II группы этот сдвиг был 5...10 нм. Такой большой сдвиг длины волны люминесценции для образцов, содержащих слой Al-GaN, может быть связан с деформацией последней квантовой ямы, из-за влияния этого слоя. Также в образцах II группы интенсивность электролюминесценции в 1,5...2 раза выше, чем в образцах I группы, что, видимо, связано с негативным влиянием слоя AlGaN на дрейф дырок в активную область.

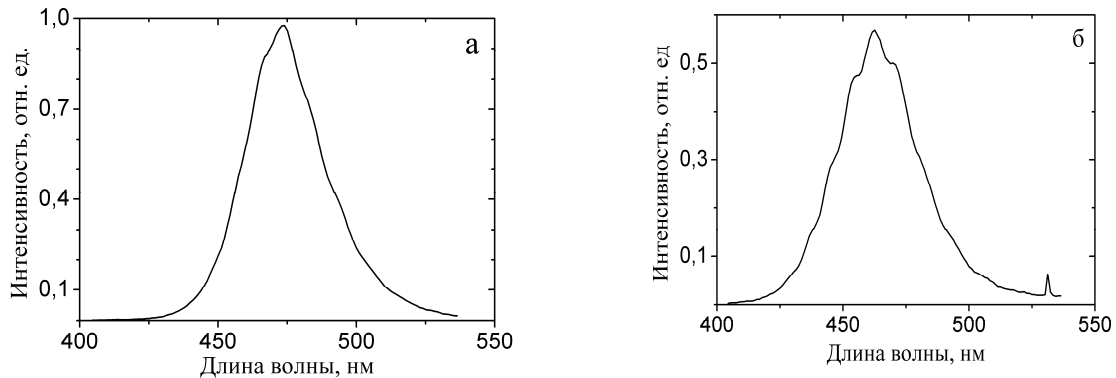


Рис. 2. Спектры: *a* – электролюминесценции и *б* – фотолюминесценции для одного образца. Сравнить интенсивности ЭЛ и ФЛ некорректно из-за разных настроек при измерениях

На рис. 3 представлены спектры ФЛ двух образцов, измеренные при температурах 5 и 300 К (эти измерения проводились в ИФП СО РАН, г. Новосибирск). В спектрах ФЛ образцов присутствуют пики от GaN на длине волны 355 и 364 нм для температуры 5 и 300 К соответственно. Основной пик от квантовых ям InGaN 453 и 463 при комнатной температуре для образца из I и II группы, соответственно. Это различие связано с разным содержанием In в ямах для этих образцов. Полоса 370...410 нм при гелиевых температурах, видимо, связана с донорно-акцепторной рекомбинацией. Пик на длине волны 650 нм связан с измерительной схемой.

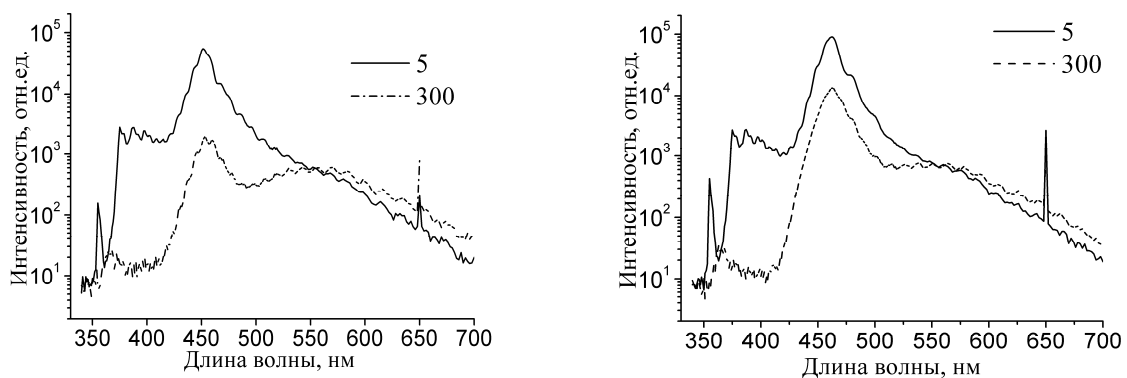


Рис. 3. Спектры фотолюминесценции при температурах 5 и 300 К. Слева спектр фотолюминесценции образца из I группы, справа – из II группы

При изменении температуры от 5 до 300 К интенсивность пика, связанного с квантовыми ямами, снижается приблизительно в 25 и 6 раз для образца из I и II групп, соответственно, что свидетельствует о большем вкладе в рекомбинацию безызлучательных механизмов для структур I группы при комнатной температуре.

**Заключение.** Таким образом, в работе исследованы две группы светодиодных структур In-GaN/GaN: классического дизайна активной области из 5 квантовых ям и с добавлением барьерного слоя AlGaN, с различными конфигурациями активной области. Показано, что в исследуемых структурах помимо сдвига максимумов длин волн электролюминесценции и фотолюминесценции из-за эффекта Штарка, присутствует сдвиг, связанный с влиянием слоя AlGaN. Обнаружено, что в свето-

диодных структурах со слоем AlGaN интенсивность электролюминесценции в 1,5...2 раза меньше, чем в структурах без этого слоя. Это, видимо, связано с затруднением дрейфа дырок в активную область. С другой стороны, наличие барьерного слоя AlGaN повышает электронное ограничение в активной области, что, в частности, сказывается на лучшей температурной стабильности интенсивности фотолюминесцентного излучения. Для дальнейшего повышения эффективности светодиодных гетероструктур необходима оптимизация геометрии и условий получения слоя AlGaN.

#### *Литература*

1. Шуберт Ф. Светодиоды: пер. с англ. – 2-е изд. – М.: Физматлит, 2008. – 496 с.
2. Варизонная активная область на основе короткопериодных InGaN/GaN-сверхрешеток для мощных светоизлучающих диодов диапазона 440–470 нм / А.Ф. Цацульников, В.В. Лундин, А.В. Сахаров и др. // Физика и техника полупроводников. – 2010. – Т. 44, № 1. – С. 96–100.

---

#### **Романов Иван Сергеевич**

Студент, каф. квантовой электроники и фотоники  
Национального исследовательского Томского государственного университета (НИТГУ)  
Тел.: 8 (382-2) 41-35-17  
Эл. почта: rff.romis@gmail.com

#### **Мармалюк Александр Анатольевич**

Д-р техн. наук, технический директор ООО «Сигм Плюс», г. Москва  
Тел.: 8 (495) 3-33-33-25  
Эл. почта: A.Marmalyuk@sipplus.ru

#### **Войцеховский Александр Васильевич**

Д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. каф. квантовой электроники и фотоники НИТГУ  
Тел.: 8 (382-2) 41-27-22  
Эл. почта: vav@elefot.tsu.ru

#### **Коханенко Андрей Павлович**

Д-р физ.-мат. наук, профессор каф. квантовой электроники и фотоники НИТГУ  
Тел.: 8 (382-2) 41-35-17  
Эл. почта: kokh@elefot.tsu.ru

Romanov I.S., Marmalyuk A.A., Voitsekhovskii A.V., Kokhanenko A.P.

#### **Light-emitting diode structures of InGaN/GaN grown by the method of metal organic chemical vapor deposition**

In this article we investigate light-emitting diode structures of InGaN/GaN in two different designs. The research concerns the structure with five quantum wells as active region and with the addition of AlGaN layer, with different configurations of active regions. The influence of AlGaN layer on luminescent characteristics of structures is shown.

**Keywords:** light-emitting diode, gallium nitride, quantum well.