

# Белая электролюминесценция структуры ZnO/GaN

© И.Е. Титков<sup>¶</sup>, А.С. Зубрилов, Л.А. Делимова, Д.В. Машовец,  
И.А. Линийчук, И.В. Грехов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 22 сентября 2006 г. Принята к печати 3 октября 2006 г.)

Обнаружена белая электролюминесценция структур ZnO/GaN, полученных методом лазерного напыления ZnO:In на структуры GaN:Mg/GaN, выращенные методом MOCVD на подложке Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Белый свет получался в результате сложения двух наиболее интенсивных спектральных линий, узкой синей и широкой желтой (длины волн в максимумах 440 и 550 нм соответственно). Соотношение интенсивностей разных спектральных линий электролюминесценции гетероструктур ZnO/GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> зависело от качества пленки ZnO и тока накачки. Белая электролюминесценция обусловлена высокой плотностью структурных дефектов на интерфейсе *n*-ZnO/*p*-GaN. Построена энергетическая диаграмма гетероструктуры *n*-ZnO/*p*-GaN/*n*-GaN и предложено качественное объяснение наблюдаемой электролюминесценции.

PACS: 71.20.Nr, 71.55.-i, 73.40.Kp, 73.40.Lq, 78.60.-b, 78.60.Fi

## 1. Введение

Для производства белых светодиодов с большой эффективностью излучения, как правило, используют многослойные MQW-структуры (в основном InGaN/GaN) в сочетании с белыми люминофорами и(или) несколько интегрированных в одном корпусе светодиодов [1,2]. Причем при использовании напряженных слоев нитридов часто флуктуирует ширина запрещенной зоны InGaN, и частота излучения отклоняется от оптимальной для эффективного возбуждения люминофора. Результатом использования таких конструкций является усложнение технологии и, как следствие, уменьшение выхода годных приборов.

Белая примесная электролюминесценция (ЭЛ) в обратно смещенных нитридных светодиодах была обнаружена уже довольно давно [3,4], однако в приборах не использовалась из-за ее низкой эффективности по сравнению с межзонной ЭЛ.

Одновременно ведутся исследования полупроводника ZnO, который может быть ярким эмиттером при комнатной температуре, потому что имеет высокую энергию экситона, 60 мэВ, по сравнению с 26 мэВ для GaN и 20 мэВ для ZnSe. Кроме того, ZnO имеет другие важные преимущества: допускает изготовление подложек большой площади, поддается обработке в жидких травителях и имеет относительно низкую стоимость. Однако существенный недостаток ZnO — это трудности с получением слоев дырочного типа проводимости. Между тем наличие обоих (*n*- и *p*-) типов проводимости принципиально важно для применения материала в светоизлучающих приборах. В последнее время опубликовано несколько теоретических [5] и экспериментальных [6,7] работ, посвященных получению ZnO *p*-типа. В работах [8,9] наблюдалась белая ЭЛ из гомопереходов *n*-ZnO/*p*-ZnO, однако ее интенсивность была крайне слабой.

В настоящее время исследуются также альтернативные варианты светодиодов на основе ZnO. Так, например, имеется несколько публикаций, в которых сообщается о наблюдении синей ( $\lambda = 400\text{--}430$  нм), ультрафиолетовой ( $\lambda = 385\text{--}395$  нм) и зеленой ( $\lambda = 500\text{--}550$  нм) ЭЛ из гетероструктур ZnO/GaN, ZnO/AlGaN, ZnO/SiC соответственно [10–12].

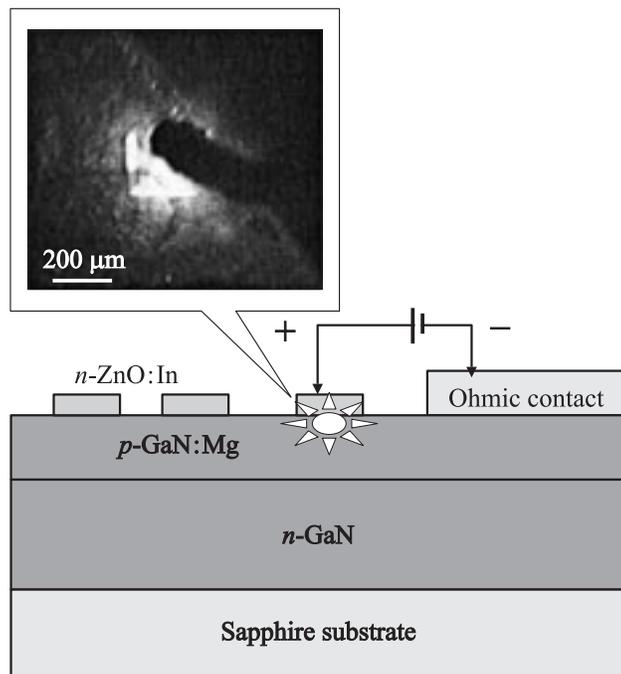
В нашей работе была получена и исследована белая ЭЛ в гетероструктурах *n*-ZnO:In/*p*-GaN:Mg/GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> без использования люминофора.

## 2. Образцы и методики измерений

Эпитаксиальные слои *p*-GaN:Mg/GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> были изготовлены в лаборатории полупроводниковых гетероструктур ФТИ. Слои общей толщиной  $\sim 5$  мкм выращивались методом MOCVD на монокристаллическом сапфире ориентации *c*-(0001) при температуре 1000°C, а затем отжигались для удаления остаточного водорода. Легированный магнием *p*-слой толщиной около 2 мкм выращен на буферном слое нелегированного GaN. Параметры слоев GaN:Mg/GaN были исследованы методами емкостного ртутного зонда, эффекта Холла и фотолюминесценции. В измерениях эффекта Холла использовался постоянный магнит с полем 1.8 Тл в зазоре 1.5 мм, изготовленный ООО „ПОЗ-Прогресс“, г. Верхняя Пышма, Свердловская область.

Гетероструктуры *n*-ZnO/*p*-GaN:Mg/GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (рис. 1) были получены лазерным напылением ZnO:In (1%) на GaN:Mg/GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Напыление производилось в атмосфере кислорода при давлении 0.2 Торр. Температура подложки изменялась в пределах 400–580°C. Цинковые мишени распылялись скрещенными лучами двух Nd:YAG-лазеров ( $\lambda = 1064$  нм), работающих в режиме модулированной добротности, при частоте повторения импульсов 14 Гц, расстояние от мишени до подложки 20–35 мм. Плазменный факел, образующийся при испарении мишени лазерным лучом, содержит наряду с

<sup>¶</sup> E-mail: ITitkov@mail.ioffe.ru



**Рис. 1.** Схематическое изображение и фотография электролюминесценции исследуемой структуры  $n\text{-ZnO}/p\text{-GaN}/n\text{-GaN}/\text{Al}_2\text{O}_3$ .

атомами (ионами) вещества мишени крупные фрагменты, капли микронных размеров. Поэтому для получения гладкой поверхности пленки между мишенью и подложкой устанавливался специальный экран, заслоняющий центральную часть подложки от прямого попадания частиц, а ее края оставались незащищенными. Соответственно в области под экраном толщина слоя ZnO была не более 50 нм (далее – „тонкий слой“), а вне экрана около 200 нм („толстый слой ZnO“). Вследствие бомбардировки пленки GaN частицами лазерного факела с высокой энергией, интерфейс между „толстой“ пленкой ZnO и GaN содержит значительно большую плотность структурных дефектов, чем интерфейс ZnO/GaN, полученный при напылении с экраном. Для формирования геометрии светодиода пленки ZnO напылялись через кремниевую маску, лежащую на подложке, со сквозными отверстиями  $200 \times 200$  мкм.

Фотолюминесценция структуры  $p\text{-GaN}:\text{Mg}/\text{GaN}$  при температуре 77 К возбуждалась импульсным азотным лазером ( $\lambda = 337.1$  нм, длительность импульса 10 нс, частота повторения 100 Гц). Лазерный пучок фокусировался в пятно  $2 \times 2$  мм при угле падения  $45^\circ$ , плотность энергии в импульсе составляла  $50$  кВт/см<sup>2</sup>. Спектры ФЛ структур  $\text{GaN}:\text{Mg}/\text{GaN}/\text{Al}_2\text{O}_3$  и ЭЛ гетероструктур  $n\text{-ZnO}/p\text{-GaN}:\text{Mg}/\text{GaN}/\text{Al}_2\text{O}_3$  измерялись цифровым трехканальным спектрометром „Ocean Optics PC-2000“ со спектральным разрешением 2 нм.

При измерении вольт-амперных характеристик (ВАХ) и ЭЛ на контакты ZnO опускался зонд из тонкой золотой

проволоки, залуженной индием. В качестве второго, квазиомического, контакта к GaN использовалась капля индия большой (несколько квадратных миллиметров) площади, napаянная на сильно проводящую аморфную пленку ZnO на краю образца.

### 3. Результаты и обсуждение

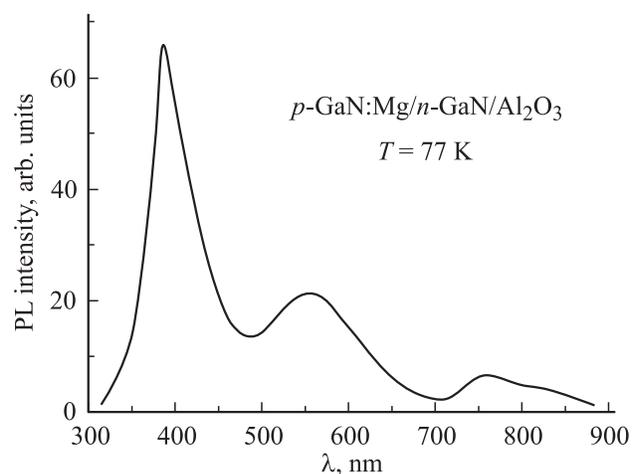
#### 3.1. Свойства структуры $p\text{-GaN}:\text{Mg}/n\text{-GaN}/\text{Al}_2\text{O}_3$

Перед нанесением пленки ZnO были исследованы структуры  $p\text{-GaN}:\text{Mg}/\text{GaN}/\text{Al}_2\text{O}_3$  и получены следующие результаты.

1) Емкостные измерения проводимости с использованием ртутного зонда показали наличие на поверхности (до глубины  $\sim 500$  нм) слоя  $p$ -типа с концентрацией дырок  $5 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>.

2) Холловские измерения были выполнены в геометрии Ван-дер-По с четырьмя двухслойными контактами Ni/Au. В исходном состоянии контактов наблюдалось высокое, порядка МОм, сопротивление образца. После пробоя контактов напряжением около 20 В сопротивление падало на несколько порядков, что подтверждает существование высокоомного (возможно, компенсированного) поверхностного слоя. Измерение эффекта Холла после пробоя контактов обнаружило проводимость  $n$ -типа с концентрацией электронов  $\sim 5 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>, подвижностью  $40$  см<sup>2</sup>/В·с, проводимостью  $300$  Ом<sup>-1</sup>·см<sup>-1</sup>. Эти данные используются далее в качестве характеристик GaN ( $n\text{-GaN}$ )-слоя. Учитывая весьма низкую подвижность, вероятно, мы имеем дело с проводимостью по дислокациям и доменным стенкам нелегированного буферного слоя, однако далее для простоты изложения будем считать этот слой GaN плоским однородным слоем  $n$ -типа.

3) Спектр ФЛ исходной структуры  $p\text{-GaN}:\text{Mg}/n\text{-GaN}/\text{Al}_2\text{O}_3$  при 77 К приведен на рис. 2. Он содержит

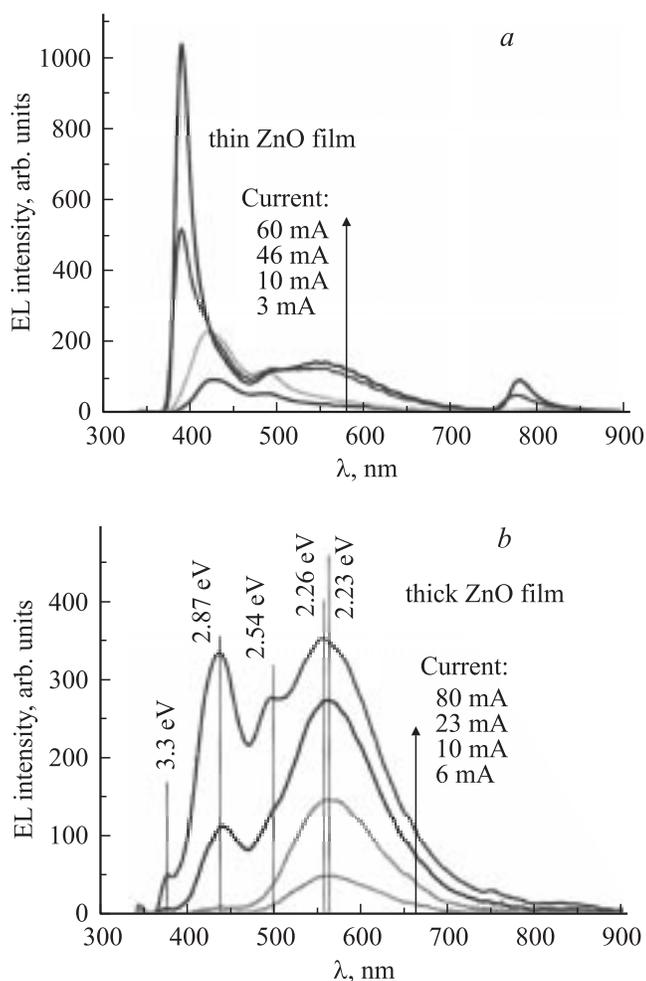


**Рис. 2.** Спектр фотолюминесценции пленки  $p\text{-GaN}:\text{Mg}/n\text{-GaN}/\text{Al}_2\text{O}_3$ , полученной методом MOCVD.

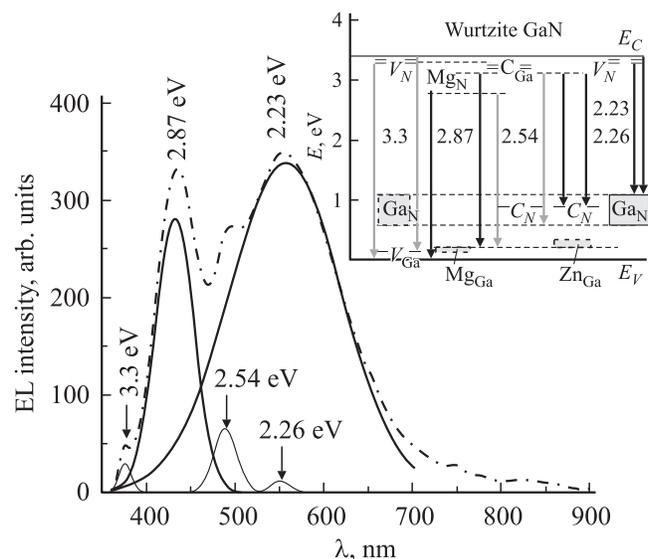
пик синей люминесценции (400 нм) и широкую желтую полосу с максимумом 550 нм, соответствующую переходам между глубокими уровнями дефектов. Синяя люминесценция в GaN обычно объясняется рекомбинацией носителей при переходах с глубокого донора на акцепторный уровень Mg. В качестве донора наиболее вероятным считается комплекс, состоящий из магния и вакансии азота [12].

### 3.2. Электролюминесценция и ВАХ структуры $n\text{-ZnO}/p\text{-GaN}:\text{Mg}/n\text{-GaN}/\text{Al}_2\text{O}_3$

В гетероструктурах  $n\text{-ZnO}/p\text{-GaN}:\text{Mg}/n\text{-GaN}/\text{Al}_2\text{O}_3$  наблюдалась относительно яркая белая ЭЛ при комнатной температуре. Абсолютная интенсивность излучения не измерялась экспериментально, но визуально была относительно высокой по сравнению с приведенной на фотографиях [8,9]. По информации авторов [3], полученное ими излучение было различимо глазом только в „темной комнате“, а для измерения спектров ЭЛ приходилось использовать собирающую линзу, в то



**Рис. 3.** Спектры электролюминесценции гетероструктуры  $n\text{-ZnO}/p\text{-GaN}/n\text{-GaN}/\text{Al}_2\text{O}_3$  при разных токах через структуру. Толщина ZnO, нм: *a* — ~ 50 нм, *b* — > 200 нм.



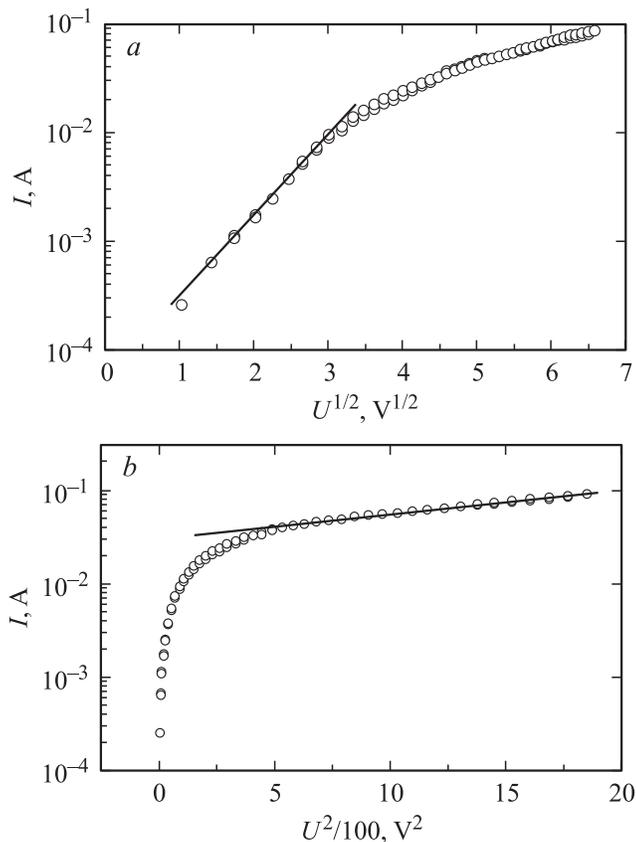
**Рис. 4.** Разложение спектра ЭЛ (верхняя кривая рис. 3, *b*) по пяти гауссовым функциям. На вставке — энергетические положения уровней дефектов в запрещенной зоне GaN, спектральные положения пиков излучения и соответствующие переходы.

время как наше излучение наблюдалось при дневном освещении. При измерении спектров не использовались собирающие линзы или зеркала.

На рис. 3, *a, b* приведены спектры ЭЛ, снятые при нескольких значениях тока с двух разных участков образца. Спектры рис. 3, *a* получены с точки, напыленной под экраном, толщина слоя ZnO менее 50 нм; спектры рис. 3, *b* сняты с точки на краю образца, с толщиной ZnO около 200 нм. Спектр ЭЛ на рис. 3, *a* близок к спектру ФЛ структуры  $p\text{-GaN}:\text{Mg}/\text{Ga}/\text{Al}_2\text{O}_3$  (рис. 2), что говорит о несущественном влиянии тонкого слоя ZnO на оптические свойства структуры. На участке с толстым ZnO-слоем при положительном смещении на ZnO обнаружена яркая ЭЛ (рис. 1 и 3, *b*). Под контактом ZnO возникает желтое свечение, переходящее с ростом тока в белое и затем фиолетово-белое. Этот спектр содержит наибольшее количество отдельных спектральных линий, и соотношение их интенсивностей зависит от тока накачки.

На рис. 4 представлены результаты разложения верхней (80 мА) кривой рис. 3, *b* по пяти гауссовым функциям. Подгонка спектра проводилась в программе „Microcal Origin“, в ходе подгонки минимизируется среднеквадратичное отклонение по  $Y$ . Суммарная подгоночная кривая легла на экспериментальные точки с точностью до 3%. В результате определены энергии пяти основных излучательных переходов: 3.3, 2.87, 2.54, 2.26 и 2.23 эВ. Сопоставление этих энергий с конкретными уровнями рекомбинационных центров будет предложено далее.

Для анализа механизма проводимости была измерена вольт-амперная характеристика  $I(U)$  структуры



**Рис. 5.** Вольт-амперная характеристика структуры ZnO:In/GaN:Mg/GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в координатах, используемых при описании: *a* — механизма Пула-Френкеля и *b* — многофононного туннелирования носителей с глубокого уровня.

*n*-ZnO/*p*-GaN:Mg/*n*-GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Она представлена на рис. 5, *a* и 5, *b*, в координатах  $I(U^{0.5})$  и  $I(U^2)$  соответственно.

### 3.3. Идеализированная энергетическая диаграмма структуры *n*-ZnO/*p*-GaN/*n*-GaN и модель излучательной рекомбинации

Для объяснения экспериментальных результатов рассмотрим идеализированную энергетическую диаграмму структуры *n*-ZnO/*p*-GaN/*n*-GaN (рис. 6). Расчет проводился по методу, описанному в [13]; параметры, используемые при построении энергетической диаграммы, приведены в таблице. Мы рассматриваем переходы как резкие и пренебрегаем флуктуациями потенциала на доменных стенках GaN, а также неоднородностью распределения примеси магния [14].

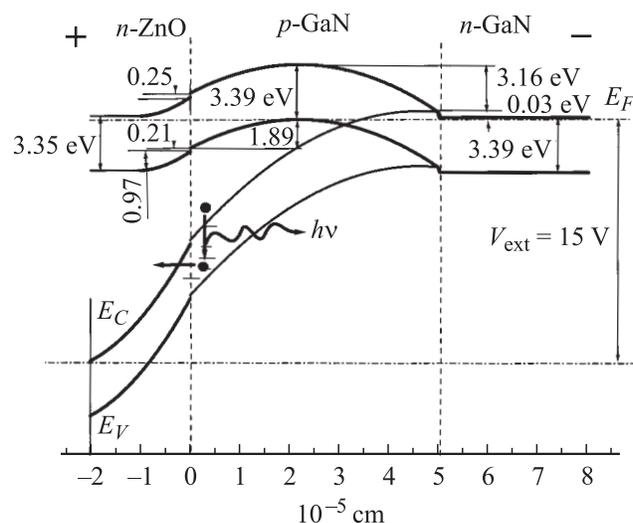
При нулевом внешнем смещении, когда уровень Ферми занимает одинаковое положение для всех трех слоев, структура содержит два встречно-включенных барьера *n*-ZnO/*p*-GaN и *p*-GaN/*n*-GaN высотой соответственно 2.9 и 3.2 эВ. Нейтральная область между ними фактически отсутствует, так как ширина области объемного заряда в *p*-GaN имеет порядок толщины слоя.

Переход *n*-ZnO/*p*-GaN содержит небольшие разрывы зоны проводимости и валентной зоны. При подаче на ZnO положительного смещения барьер *n*-ZnO/*p*-GaN оказывается смещенным в обратном направлении, а *p*-GaN/*n*-GaN соответственно в прямом. В этом случае почти все приложенное смещение падает на обратно смещенном *n*-ZnO/*p*-GaN-переходе.

Параметры слоев, использованные при построении идеализированной энергетической диаграммы

	<i>n</i> -ZnO	<i>p</i> -GaN	<i>n</i> -GaN
Сродство к электрону $X$ , эВ	4.35	4.1	4.1
Ширина запрещенной зоны, эВ	3.35	3.39	3.39
Концентрация носителей, см <sup>-3</sup>	10 <sup>17</sup>	5 · 10 <sup>16</sup>	5 · 10 <sup>18</sup>
Химический потенциал $\mu$ , эВ (от дна зоны проводимости)	-0.1	-3.21	0.02
Диэлектрическая постоянная $\epsilon$	8.7	8.9	8.9
Толщина слоя, см	2 · 10 <sup>-5</sup>	5 · 10 <sup>-5</sup>	2.5 · 10 <sup>-4</sup>

В нашей модели излучательной рекомбинации предполагается, что первичные неравновесные носители появляются в результате стимулированной электрическим полем ионизации глубоких центров, имеющих уровни в запрещенной зоне GaN. Неравновесные дырки эмитируются с глубокого уровня в валентную зону *p*-GaN, переносятся полем к прямо смещенному *p*-GaN/*n*-GaN-переходу и тормозятся встречным барьером этого перехода, что вызывает инжекцию неравновесных электронов из *n*-GaN. В пользу этой гипотезы свидетельствует наблюдаемая ВАХ, показанная на рис. 5. При малых напряжениях логарифм тока пропорционален корню от приложенного смещения (рис. 5, *a*), что указывает на эмиссию носителей с глубокого уровня по механизму Пула-Френкеля. При  $U > 20$  В логарифм тока пропор-



**Рис. 6.** Идеализированная зонная диаграмма гетероструктуры *n*-ZnO/*p*-GaN/*n*-GaN без внешнего смещения и при смещении +15 В на ZnO-контакте.

ционален квадрату электрического поля, что характерно для многофононного туннелирования носителя с глубокого уровня [15]. Время туннелирования носителей с глубокого центра, определенное из наклона этой зависимости, имеет порядок  $\tau \approx 10^{-14}$  с, что гораздо меньше времени пролета носителей через область объемного заряда,  $10^{-12}$  с. Следовательно, неравновесный электрон за время пролета слоя  $p$ -GaN имеет достаточно времени для излучательной рекомбинации с дыркой, находящейся на глубоком центре. В результате рекомбинации уровень этого центра снова заполняется, и в сильном электрическом поле центр может эмитировать электрон, тем самым создается локализованная дырка для следующего акта рекомбинации. Таким образом, в модели учитываются два процесса перезарядки глубокого уровня: эмиссия носителей, стимулированная электрическим полем, и излучательная рекомбинация.

Рассмотрим возможные пути излучательной рекомбинации неравновесных носителей. В литературе имеются различные данные о ширине запрещенной зоны GaN ( $E_g = 3.38\text{--}3.48$  эВ), мы используем в расчетах значение  $3.39$  эВ [16]. Тогда полоса ЭЛ с максимумом  $\lambda = 376$  нм ( $3.3$  эВ) может быть приписана рекомбинации между мелким донором (например, вакансией азота  $V_N = 100$  мэВ) и валентной зоной. Полосу с максимумом  $\lambda = 432$  нм ( $2.87$  эВ) можно идентифицировать с переходами между донорными уровнями ( $Mg_N = 260$  мэВ) и опустошенными акцепторами уровнями ( $Mg_{Ga} = 210$  мэВ), а пик при  $\lambda = 488$  нм ( $2.54$  эВ) с переходами между вакансией азота и углеродом ( $C_N = 0.89$  эВ) (см. вставку на рис. 4). Широкая желтая полоса  $\lambda \approx 550$  нм ( $2.2\text{--}2.3$  эВ) наблюдается обычно во всех слоях GaN независимо от технологии выращивания и однозначно связывается с дефектами решетки [17]. Таким образом, белая ЭЛ обусловлена наложением двух наиболее ярких спектральных линий: синей,  $\lambda = 440$  нм ( $2.87$  эВ), связанной с переходами между мелким донором и валентной зоной GaN, и желтой,  $\lambda \approx 550$  нм ( $2.2\text{--}2.3$  эВ), связанной с дефектами решетки GaN.

Условия напыления ZnO определяют состояние дефектных уровней на интерфейсе ZnO/GaN и тем самым влияют на спектр рекомбинационного излучения. При использовании тонких гладких пленок ZnO:In в спектре доминировала синяя полоса ЭЛ, а толстые и разориентированные пленки демонстрировали набор нескольких спектральных линий (см. рис. 3, *a* и 3, *b*). При этом интенсивности синей и желтой линий близки, что обеспечивает белое свечение. Заметим, что присутствие синей линии, которая связывается с областью  $p$ -GaN, не зависело от условий напыления ZnO.

#### 4. Заключение

Получена белая электролюминесценция из гетероструктуры  $n$ -ZnO/ $p$ -GaN/ $n$ -GaN/ $Al_2O_3$ . На основе анализа измеренных характеристик структуры предложено

качественное объяснение наблюдаемых эффектов. Белая ЭЛ наблюдалась под толстыми  $n$ -ZnO-электродами, полученными лазерным напылением, на участках с высокой плотностью структурных дефектов на интерфейсе  $n$ -ZnO/ $p$ -GaN и обусловлена наложением двух наиболее ярких спектральных линий: синей,  $\lambda = 440$  нм ( $2.87$  эВ), связанной с переходами между мелким донором и валентной зоной GaN, и желтой,  $\lambda \approx 550$  нм ( $2.2\text{--}2.3$  эВ), связанной с дефектами решетки GaN. Технология напыления ZnO существенно влияет на свойства рекомбинационного излучения и определяет основные характеристики полученного светодиода.

Результаты следует рассматривать как предварительные и требующие дальнейшего детального исследования. Однако уже сейчас можно оценить преимущества и недостатки технологического процесса изготовления таких светодиодов. Недостатки: необходимость использования эпитаксиальной пленки GaN, полученной в другом технологическом процессе (MOCVD); спектр менее сплошной, чем при использовании люминофоров. К преимуществам относятся: использование прозрачного и термостойкого ZnO-электрода; относительная дешевизна технологии лазерного напыления ZnO (расходные материалы — только цинк и кислород; для формирования геометрии прибора используются маски и не требуется фотолитография); возможность технологического и электрического управления спектром излучения; отсутствие люминофоров.

Авторы выражают искреннюю благодарность А.Ф. Цацульникову за предоставление MOCVD-структур GaN и Н.М. Шмидт за емкостные измерения и ценные обсуждения.

Работа выполнена при финансовой поддержке ЗАО НПК „Электровыпрямитель“ (г. Саранск), фонда президента РФ (грант МК-1536.2006.2) и РФФИ (грант № 06-08-01370-а).

#### Список литературы

- [1] Ю.Г. Шретер, Ю.Т. Ребане, В.А. Зыков, В.Г. Сидоров. *Широкозонные полупроводники* (СПб., Наука, 2001).
- [2] Ю. Давиденко. *Соврем. электроника*, **10**, 36 (2004).
- [3] А.Н. Ковалев, Ф.И. Маняхин, В.Е. Кудряшов, А.Н. Туркин, А.Э. Юнович. *ФТП* **32** (1), 63 (1998).
- [4] А.Г. Дрижук, М.В. Зайцев, В.Г. Сидоров, Д.В. Сидоров. *Письма ЖТФ*, **22** (11), 23 (1996).
- [5] Y.Y. Yan, S.B. Zhang, S.T. Pantelides. *Phys. Rev. Lett.*, **86**, 5723 (2001).
- [6] Y.R. Ryu, S. Zhu, D.C. Look, J.M. Wrobel, H.M. Jeong, H.W. White. *J. Cryst. Growth*, **216**, 330 (2000).
- [7] M. Joseph, H. Tabata, H. Saeki, K. Ueda, T. Kawai. *Physica B*, **302–303**, 140 (2001).
- [8] T. Aoki, Y. Hatanaka, D.C. Look. *Appl. Phys. Lett.*, **76**, 3257 (2000).
- [9] X.-L. Guo, J.-H. Choi, H. Tabata, T. Kawai. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **40**, L177 (2001).

- [10] Q.-X. Yu, B. Xu, Q.-H. Wu, Y. Liao, G.-Zh. Wang, R.-Ch. Fang, H.-Y. Lee, Ch.-T. Lee. *Appl. Phys. Lett.*, **83** (23), 4713 (2003).
- [11] Ya.I. Alivov, E.V. Kalinina, A.E. Cherenkov, D.C. Look, B.M. Ataev, A.K. Omaev, M.V. Chukichev, D.M. Bagnall. *Appl. Phys. Lett.*, **83** (23), 4719 (2003).
- [12] B.M. Ataev, Ya.I. Alivov, E.V. Kalinina. 2nd Conf. GaN (Flagstaff, Arizona, USA, May 2004).
- [13] В.И. Ильин, С.Ф. Мусихин, А.Я. Шик. *Варизонные полупроводники и гетероструктуры* (СПб., Наука, 2000).
- [14] A.A. Greshnov, D.M. Bauman, B.Y. Ber, A.E. Chernyakov, A.P. Kovarskiy, A.M. Kovtunovich, N.M. Schmidt, B.S. Yavich, A.L. Zakgeim. *Proc. 14th Int. Symp. „Nanostructures: Physics and Technology“* (St. Petersburg, Russia, June 26–30, 2006) p. 242.
- [15] С.Д. Ганичев, И.Н. Ясиевич, В. Преттл. *ФТТ*, **39**, 1905 (1997).
- [16] V. Bougrov, M.E. Levinshtein, S.L. Rumyantsev, A. Zubrilov. *Properties of Advanced Semiconductor Materials GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe*, eds M.E. Levinshtein, S.L. Rumyantsev and M.S. Shur (John Wiley & Sons, Inc., N.Y., 2001).
- [17] S. Nakamura, Chichibu, F. Shigefusa. *Nitride Semiconductor Blue Lasers and Light Emitting Diodes* (CRC Press, 2000).

Редактор Л.В. Беляков

## White electroluminescence of ZnO/GaN structure

I.E. Titkov, A.S. Zubrilov, L.A. Delimova,  
D.V. Mashovets, I.A. Liniichuk, V. Grekhov

Ioffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** A bright white electroluminescence (EL) from ZnO/GaN heterostructures produced by pulsed laser deposition of ZnO:In onto MOCVD GaN:Mg/GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> structures has been observed. The white luminescence appeared owing to the superposition of two most intensive spectral peaks, a narrow blue and a broad yellow ones, with the wavelength of 440 and 550 nm, respectively. The ratio of intensities of different EL peaks of ZnO/GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> heterostructures depends on ZnO film quality and on the drive current. A bright white EL is attributed to a high density of structure defects at the *n*-ZnO/*p*-GaN interface. The energy diagram of *n*-ZnO/*p*-GaN/*n*-GaN heterostructure is presented, and a qualitative model of the observed EL is proposed.