

# Квантовая эффективность и формирование линии излучения в светодиодах с квантовыми ямами InGaN/GaN

© Н.И. Бочкарева<sup>¶</sup>, Д.В. Тархин, Ю.Т. Ребане, Р.И. Горбунов, Ю.С. Леликов, И.А. Мартынов, Ю.Г. Шретер

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

(Получена 30 мая 2006 г. Принята к печати 19 июня 2006 г.)

Исследованы спектры электролюминесценции, фотолюминесценции и фототока в структурах с квантовыми ямами  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$  с целью выяснения причин падения квантовой эффективности с увеличением прямого тока. Установлено, что квантовая эффективность падает, когда энергия излучаемого фотона приближается к порогу подвижности в слое  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ . Порог подвижности, определенный из спектров фототока, составил  $E_{\text{пе}} = 2.89$  эВ. При энергиях  $h\nu > 2.69$  эВ носители заряда имеют вероятность туннелировать на безызлучательные центры рекомбинации, поэтому время жизни и квантовая эффективность падают. Туннельная инжекция в глубокие локализованные состояния обеспечивает максимальную эффективность электролюминесценции, что объясняет причину характерного максимума эффективности светодиодов при плотностях тока, значительно меньших, чем рабочие. Заселение глубоких локализованных состояний в „хвостах“ плотности состояний InGaN играет также доминирующую роль в формировании линии излучения. Обнаружено, что рост эффективности и „красный“ сдвиг спектра ФЛ с напряжением коррелирует с изменением фототока и связаны с уменьшением разделения фотоносителей в поле области объемного заряда и их термализацией в глубокие локализованные состояния.

PACS: 73.40.Kp, 73.63.Hs, 78.55.Cr, 78.60.Fi, 78.67.De, 85.60.Jb

## 1. Введение

Высокую квантовую эффективность излучения квантовых ям InGaN/GaN в литературе часто связывают с локализацией экситонов на флуктуациях потенциала в активном слое InGaN и на интерфейсах InGaN/GaN [1–5]. Неоднородные флуктуации потенциала могут быть вызваны флуктуациями состава или разделением фаз в слое InGaN, а также другими несовершенствами кристалла, которые приводят к локальным флуктуациям ширины запрещенной зоны в плоскости слоев InGaN и образованию „хвостов“ плотности состояний [6–8]. Экспериментально в активном слое InGaN наблюдались как крупномасштабные неоднородности размерами  $\sim 1$  мкм, так и мелкомасштабные неоднородности размерами  $< 20$ – $60$  нм, обогащенные по составу In [6–7,9]. Считается, что локализация носителей заряда подавляет латеральную диффузию к центрам безызлучательной рекомбинации, включая дислокации, границы зерен или раздела фаз, и обеспечивает высокую квантовую эффективность светодиодов на основе нитрида галлия. Конкурирующим механизмом, уменьшающим перекрытие волновых функций электрона и дырки в квантовой яме, является встроенное пьезоэлектрическое поле, возникающее в процессе роста из-за напряжения, вызванного рассогласованием решеток InGaN и GaN и направленное противоположно полю области объемного заряда [10].

Степень влияния каждого из этих механизмов на характеристики электролюминесценции (ЭЛ) и фотолюминесценции (ФЛ) структур InGaN/GaN остается неопределенной. Многие экспериментальные факты находят качественное объяснение в рамках обоих механизмов.

Так, наблюдавшийся в ряде работ стоксов сдвиг между линией излучения и краем спектра поглощения или фототока объясняется возможностью излучать фотоны с меньшей энергией, чем поглощенные, в результате перекрытия между волновыми функциями электрона и дырки, пространственно разделенными пьезоэлектрическим полем в активном слое InGaN [11] или локализацией оптически генерированных носителей заряда в потенциальных минимумах [12]. „Голубой“ сдвиг спектра излучения с увеличением уровня оптической или электрической инжекции объясняется заполнением „хвоста“ плотности состояний [13] либо экранированием внутреннего электрического поля генерированными носителями заряда [2,10]. В то же время „красный“ сдвиг спектра ФЛ, наблюдающийся при росте прямого смещения, объясняют увеличением электрического поля в квантовой яме InGaN/GaN [14].

Однако в литературе уделяется значительно меньше внимания механизму и эффективности электрической и оптической инжекции носителей заряда в активную область. Такие исследования способны дать информацию о механизме излучения и необходимы для совершенствования твердотельных источников освещения на основе структур InGaN/GaN. Между тем даже в высокоэффективных структурах InGaN/GaN квантовая эффективность максимальна при токах инжекции, составляющих 0.01–0.1 от рабочего тока светодиодов, и падает при плотности тока  $> 0.4$ – $4$  А/см<sup>2</sup> [15]. Ранее в литературе падение коэффициента инжекции с ростом прямого тока связывалось с неэффективным захватом электронов в квантовую яму InGaN/GaN и их инжекцией в *p*-GaN [15]. Однако, как было показано в работе [16], при типичной для эффективных структур

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

плотности дырок в слоях  $p$ -GaN и  $p$ -AlGaN, равной  $N_p = 3 \cdot 10^{17} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$  [17], „перетекание“ электронов „над“ квантовой ямой в слой  $p$ -GaN пренебрежимо мало при плотности тока  $< 10^3 \text{ А/см}^2$ . В работе [18] рост инжекционных потерь с напряжением связывался нами с доминированием туннелирования электронов на состоянии интерфейсов InGaN/GaN и их безызлучательной рекомбинацией с дырками.

Цель настоящей работы — исследовать механизм формирования линии излучения в структурах с квантовыми ямами  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$  и выяснить его роль в падении эффективности электролюминесценции с увеличением прямого тока. С этой целью в работе проведены измерения спектров электролюминесценции, фотолюминесценции и фототока при прямых смещениях структур  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$  и проанализирован вклад механизмов инжекции в основные характеристики ЭЛ и ФЛ.

## 2. Эксперимент

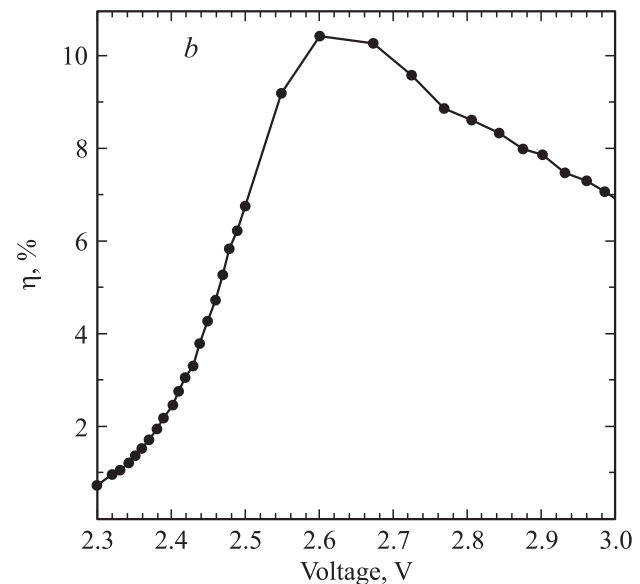
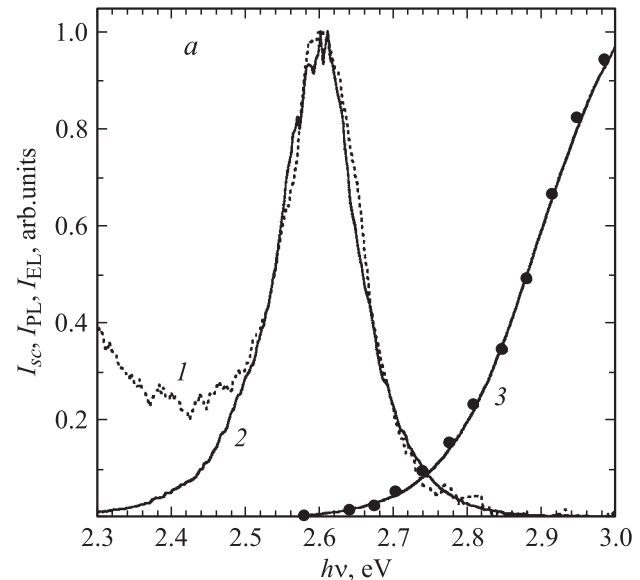
Исследовались структуры  $p$ -GaN/ $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}/n$ -GaN с активным слоем  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$  толщиной  $30 \text{ \AA}$ , изготовленные методом MOCVD. Структуры содержали полупрозрачный контакт Ni/Au к слою  $p$ -GaN и контакт Al/Ti к слою  $n$ -GaN. Детали структуры приведены в [19]. Реальная площадь структур  $S = 6 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$ . Квантовая эффективность структур составила 7% при прямом смещении  $U = 3 \text{ В}$  и токе  $20 \text{ мА}$ , длина волны в максимуме спектра излучения составила  $465 \text{ нм}$  при полуширине спектра  $20 \text{ нм}$ .

Фотолюминесценция возбуждалась He–Cd-лазером мощностью  $20 \text{ мВт}$  на длине волны  $\lambda = 325 \text{ нм}$  ( $h\nu = 3.81 \text{ эВ}$ ) при диаметре пучка  $0.9 \text{ мм}$ . Измерения спектров фотолюминесценции и электролюминесценции проводились на спектрометре AvaSpec-2048. Измерения спектров фототока проводились при освещении структур монохроматическим светом лампы накаливания с помощью монохроматора МДР-2.

## 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

### 3.1. Спектры излучения и фототока

На рис. 1, *a* представлены спектры ФЛ и ЭЛ, измеренные при прямом напряжении  $2.23$  и  $2.6 \text{ В}$  соответственно, и спектр фототока короткого замыкания. Представленные спектры ФЛ и ЭЛ имеют близкие положения максимума излучения ( $h\nu_{\text{max}} = 2.61 \text{ эВ}$ ) и полуширину. В спектре ФЛ наблюдается также полоса „желтой“ люминесценции, связанная с присутствием дефектов в слое GaN. Спектры излучения сдвинуты к меньшим энергиям относительно спектра фототока короткого замыкания  $I_{\text{sc}}(h\nu)$ . При  $h\nu < h\nu_{\text{max}} = 2.61 \text{ эВ}$  величина фототока резко падает.



**Рис. 1.** *a* — спектры фотолюминесценции (1), электролюминесценции (2) и фототока короткого замыкания (точки — эксперимент, сплошная кривая — результат подгонки по формуле (1)) (3) структуры  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ .  $U, \text{ В}$ : 1 —  $2.23$ , 2 —  $2.6$ .  $I, \text{ мА}$ : 1 —  $9.4 \cdot 10^{-3}$ , 2 —  $2.2$ . *b* — зависимость квантовой эффективности структуры  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$  от прямого напряжения.

Спектр фототока, пропорционального коэффициенту поглощения, имеет вид, характерный для уширения края поглощения с экспоненциально спадающими хвостами плотности состояний [12,20]:

$$I_{\text{sc}}(h\nu) \propto [1 + \exp\{(E_{\text{me}} - h\nu)/E_U\}]^{-1}, \quad (1)$$

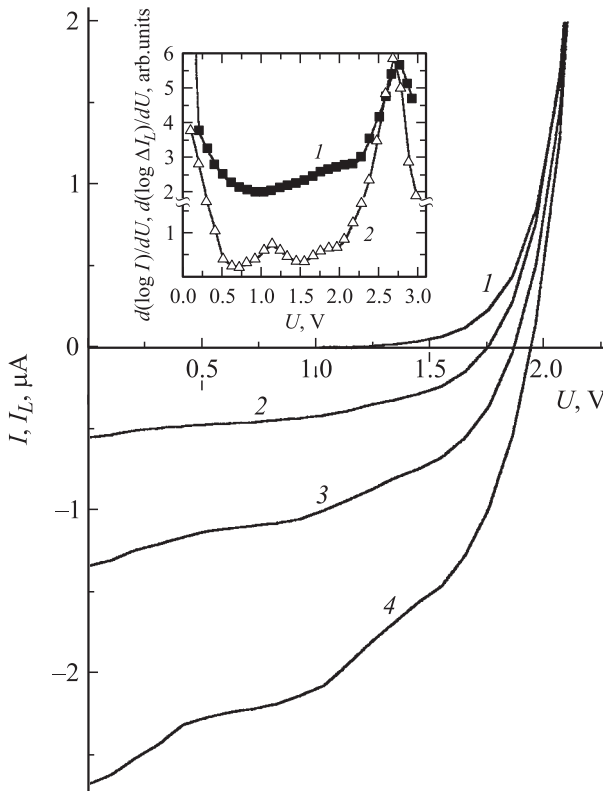
где  $E_{\text{me}}$  — порог подвижности („эффективная ширина запрещенной зоны“ в активном слое  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ ),  $E_U$  — энергия локализации, определяющая уширение спектра и эквивалентная урбаховской энергии. Эксперименталь-

ный спектр фототока хорошо описывается этим соотношением при  $E_{me} = 2.89$  эВ и  $E_U = 61$  мэВ. В результате стокосов сдвиг между краем поглощения и энергией пика ЭЛ составляет 0.23 эВ.

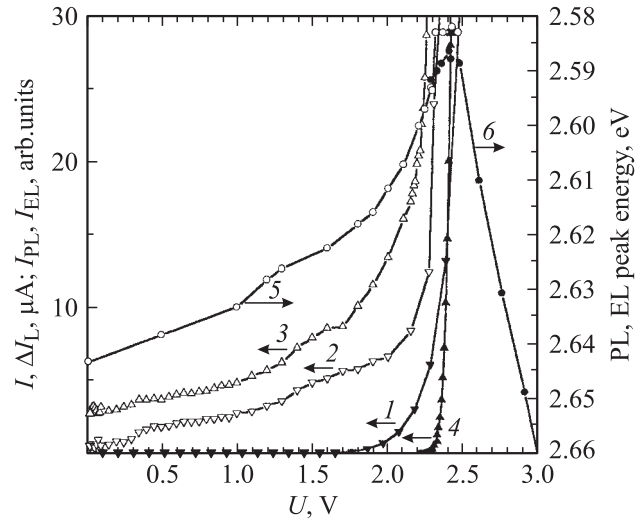
На рис. 1, *b* представлена зависимость квантовой эффективности структуры  $\eta$  от прямого смещения. Максимальная квантовая эффективность наблюдается при напряжении  $U = 2.6$  В и токе 2 мА и составила  $\eta_{max} = 10.5\%$ . При увеличении напряжения до рабочего напряжения в светодиодах  $U = 3$  В и тока до 20 мА квантовая эффективность падает до  $\eta = 0.66\eta_{max} = 7\%$ .

### 3.2. Немонотонное увеличение прямого тока при освещении

На рис. 2 представлены зависимости тока от напряжения, измеренные без освещения (кривая 1) и при освещении лампой накаливания (кривые 2–4). В идеальной *p-n*-структуре при прямом смещении световой ток  $I_L(U, L)$  равен сумме прямого тока  $I(U)$ , не зависящего от интенсивности света  $L$ , и фототока  $I_{sc}(L)$ , не зависящего от напряжения:  $I_L(U, L) = I(U) + I_{sc}(L)$ . Из рис. 2 видно, что световой ток уменьшается с напряжением быстрее, чем растет темновой ток, так как прямой



**Рис. 2.** Вольт-амперные характеристики неосвещенной (1) и освещенной лампой накаливания (2–4) структуры  $In_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN$ . Вставка — изменение наклона характеристик  $\log I(U)$  (1) и  $\log I_L(U)$  (2) с увеличением прямого напряжения. Интенсивность света, мВт/см<sup>2</sup>: 2 — 20, 3 — 50, 4 — 100.



**Рис. 3.** Зависимости прямого тока ( $I$ ), увеличения прямого тока  $\Delta I_L$  (2) и интенсивности фотоломинесценции (3) при лазерном возбуждении, интенсивности электролюминесценции (4), энергии пиков спектров ФЛ (5) и ЭЛ (6) от прямого напряжения.

ток  $I_{FL}$  немонотонно увеличивается при освещении:  $I_{FL}(U, L) = I(U) + \Delta I_L(U, L)$ .

Немонотонное поведение светового тока с напряжением наблюдалось и при лазерном возбуждении ФЛ ( $h\nu > E_g^{GaN}$ ). При лазерном возбуждении наблюдался фототок  $I_{sc} = 40$  мкА. Так как прямой ток неосвещенной структуры при  $U < 2$  В меньше 1 мкА, в идеальной *p-n*-структуре световой ток должен был бы отличаться от  $I_{sc}$  не более, чем на 1 мкА до  $U \approx 2$  В. Следовательно, по крайней мере при  $U < 2$  В прямое смещение не должно было бы оказывать заметного влияния на разделение носителей заряда, генерированных светом. На рис. 3 представлены зависимости прямого тока (кривая 1) и разности между прямыми токами освещенной и неосвещенной структур  $\Delta I_L(U) \equiv I_L(U) + I_{sc} - I(U)$  (кривая 2) от прямого смещения. На кривой  $\Delta I_L(U)$ , как и при освещении светом с энергиями фотонов  $h\nu < E_g^{GaN}$ , отчетливо видны перегибы вблизи 0.5 и 1.5 В, где ток слабее растет с напряжением.

Величина фотоэдс холостого хода составила  $U_{oc} = 2.28$  В. Отметим, что в отсутствие влияния освещения на величину прямого тока и  $\Delta I_L(U) = 0$  при  $I_{sc} = 40$  мкА равенство  $I(U) = I_{sc}$  достигалось бы при большей величине фотоэдс  $U_{oc} = 2.36$  В.

Избыточный ток структур с квантовыми ямами  $InGaN/GaN$ , наблюдающийся при напряжениях, меньших напряжения  $U_{EL}$ , при котором обнаруживается ЭЛ, связывают с туннелированием носителей заряда в локальных дефектных областях [21–23]. В работе [18] избыточный ток связывается с туннелированием электронов на состояния, локализованные на интерфейсах  $InGaN/GaN$ , и их рекомбинацией с дырками. Дифференцирование кривых  $\log \Delta I_L(U)$  и  $\log I(U)$  (см. встав-

ку к рис. 2) показывает, что уменьшение их