

**Закономерности изменения  
внешней квантовой эффективности InGaN/GaN  
зеленых светодиодов в процессе ускоренных испытаний**

**В.А. Сергеев<sup>1,2</sup>, И.В. Фролов<sup>1</sup>, А.А. Широков<sup>1</sup>, О.А. Радаев<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Ульяновский филиал института радиотехники и электроники  
им. В. А. Котельникова Российской академии наук,  
г. Ульяновск, Россия

<sup>2</sup>Ульяновский государственный технический университет,  
г. Ульяновск, Россия

*sva@ulstu.ru*

Причины и механизмы изменения квантовой эффективности и других характеристик гетероструктур InGaN/GaN в различных режимах работы активно исследуются.

Представлены результаты экспериментального исследования изменения внешней квантовой эффективности маломощных InGaN/GaN зеленых светоизлучающих диодов с квантовой ямой и без нее в области пространственного заряда (ОПЗ) гетероструктуры в режиме ускоренных испытаний. Установлено, что после 8 ч испытаний при температуре 300 К в импульсном режиме с амплитудой импульсов тока 0,5 А, длительностью импульсов 100 мкс и скважностью 100 у всех светодиодов без квантовой ямы в ОПЗ внешняя квантовая эффективность увеличивается, а у светодиодов с квантовой ямой уменьшается во всем диапазоне рабочих токов. Показано, что при низком уровне инжекции интенсивность излучения светодиодов без квантовой ямы в ОПЗ определяется рекомбинационными процессами по механизму Шокли – Рида – Холла, а с квантовой ямой – туннельно-рекомбинационными процессами.

Токовая тренировка в форсированном импульсном режиме зеленых светодиодов на основе гетероструктур InGaN/GaN в течение 4 ч может быть использована как технологическая операция для стабилизации их светотехнических характеристик и выявления потенциально ненадежных изделий в условиях массового производства.

*Ключевые слова:* светодиод; гетероструктура; квантовая яма; внешняя квантовая эффективность; излучательная и безызлучательная рекомбинация; время жизни носителей заряда.

Для цитирования: Сергеев В.А., Фролов И.В., Широков А.А., Радаев О.А. Закономерности изменения внешней квантовой эффективности InGaN/GaN зеленых светодиодов в процессе ускоренных испытаний // Изв. вузов. Электроника. – 2017. – Т.22. – №2. – С. 220–230.

## Regularities of Change of External Quantum Efficiency of InGaN/GaN Green Light Emitting Diodes in Accelerated Testing Process

V.A. Sergeev<sup>1,2</sup>, I.V. Frolov<sup>1</sup>, A.A. Shirokov<sup>1</sup>, O.A. Radaev<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Ulyanovsk Branch of Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, Ulyanovsk, Russia*

<sup>2</sup>*Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia*

sva@ulstu.ru

The reasons and mechanisms of Change of the quantum efficiency and other characteristics of InGaN/GaN in various operation conditions are actively being investigated.

The results of experimental research of changes of the external quantum efficiency of low-power InGaN/GaN green LEDs with the quantum well in the space charge region (SCR) of heterostructures and without quantum well in the process of accelerated tests have been presented. It has been found that after 8 hrs of testing at the temperature of 300 K in the pulsed mode with the current pulse amplitude of 0.5 A, the pulse duration of 100 microseconds and the relative pulse duration of 100 the external quantum efficiency of all LEDs without quantum wells has increased, while the external quantum efficiency of LEDs with quantum well has decreased in the range of operating currents. It has been shown that at low injection levels the radiation power of LEDs without the quantum well is determined by the recombination processes by the mechanism of Shockley-Reed-Hall and with the quantum well – by the tunnel-recombination processes.

The current training in the accelerated pulse mode of green light diodes based on the InGaN/GaN during 4 hours can be used as a technological operation to stabilize light-technical characteristics of these diodes and to reveal potentially unreliable items in large scale production conditions.

**Keywords:** LED; heterostructure; quantum well; external quantum efficiency; degradation, radiative and non-radiative recombination; lifetime of charge carriers.

*For citation:* Sergeev V.A., Frolov I.V., Shirokov A.A., Radaev O.A. Regularities of Change of External Quantum Efficiency of InGaN/GaN Green Light Emitting Diodes in Accelerated Testing Process // Proc. of universities. Electronics. – 2017. – Vol.22. – №2. – P. 220–230.

**Введение.** Эффекты снижения энергетической эффективности светоизлучающих диодов (СИД) на основе гетероструктур InGaN/GaN в процессе эксплуатации активно исследуются в ведущих лабораториях мира на протяжении двух последних десятилетий. Однако физические механизмы этих эффектов изучены далеко не полностью [1–3]. До настоящего времени не разработаны теоретические модели, удовлетворительно описывающие механизмы спада внешней квантовой эффективности при плотности тока более 1–5 А/см<sup>2</sup>, немономонное изменение интенсивности излучения и отказ некоторого числа СИД в первые десятки и сотни часов работы [1–7].

Остаются предметом дискуссий вопросы о том, в каких областях и какого вида дефекты генерируются в процессе работы СИД, какие механизмы ответственны за деградацию электрофизических и светотехнических характеристик гетероструктур [4]. Изучение причин и механизмов изменения квантовой эффективности и других характеристик гетероструктур InGaN/GaN в различных режимах работы осложняется тем, что характеристики СИД на основе нитридов в сильной степени зависят от технологии изготовления, типа и концентрации легирующей примеси, структурных дефектов и ряда других факторов [3]. В результате этих различий в начале испытаний у СИД на основе нитридов наблюдается как уменьшение, так и увеличение интенсивности излучения, а причины этих изменений не находят однозначного объяснения.

В настоящей работе приведены и проанализированы экспериментально установленные закономерности изменения внешней квантовой эффективности зеленых СИД на основе гетероструктур InGaN/GaN в процессе испытаний в импульсном режиме при повышенном токе.

**Условия эксперимента.** Исследованы коммерческие зеленые СИД на основе гетероструктур InGaN/GaN типа ARL-5213PGC-12cd фирмы Arlight со следующими параметрами: длина волны в максимуме спектра излучения  $\lambda_{\max} = 525$  нм, максимальный импульсный ток  $I_{\text{имп max}} = 100$  мА при скважности 10 и длительности импульса 10 мс, максимальная рассеиваемая мощность  $P_{\max} = 120$  мВт, размеры кристалла  $330 \times 270$  мкм.

Испытания проводились в импульсном режиме при температуре окружающей среды 300 К, амплитуде импульсов тока 0,5 А, длительности импульсов 100 мкс и скважности 100. Среднее значение рассеиваемой СИД мощности в этом режиме составляло 42 мВт. Согласно оценкам, полученным на основании результатов измерения теплового сопротивления и тепловой постоянной времени кристалла СИД, температура активной области СИД при испытаниях не превышала 30 °С.

На начальном этапе исследований путем измерения вольт-фарадных характеристик (ВФХ) и расчета профиля распределения концентрации основных носителей заряда в гетероструктуре на выборке из 150 штук СИД выявлены два существенно различных вида указанного профиля. Поэтому исследованную выборку разделили по виду концентрационного профиля в гетеропереходной области СИД на две группы: СИД с квантовой ямой в области пространственного заряда (ОПЗ) и без квантовой ямы в ОПЗ (рис. 1). Ширина ОПЗ СИД без квантовой ямы  $w_1 \approx 170$  нм, ширина ОПЗ СИД с квантовой ямой  $w_2 \approx 140$  нм. Причины выявленных различий, вероятно, обусловлены вариацией технологического процесса изготовления СИД.

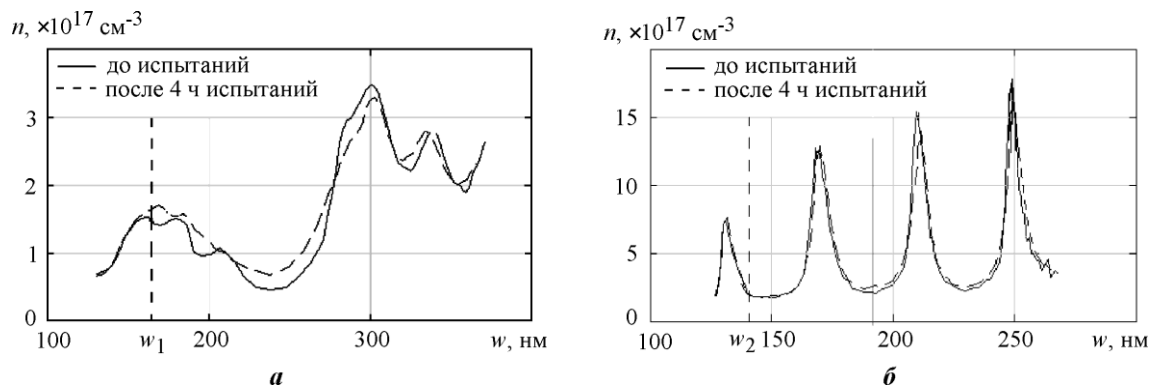


Рис. 1. Концентрационный профиль распределения основных носителей заряда в гетероструктуре СИД без квантовой ямы в ОПЗ (а) и с квантовой ямой (б) в ОПЗ (вертикальные штриховые линии – границы ОПЗ при нулевом смещении на гетеропереходе)

До испытаний и через 1, 4 и 8 ч в процессе испытаний измеряли ВАХ, ватт-амперные характеристики, ВФХ СИД. Измерение ВФХ проводилось на автоматизированной установке [8] при напряжении смещения от +2 до –25 В.

**Результаты эксперимента и обсуждение.** Из рис. 1 следует, что профили распределения концентрации носителей заряда в гетероструктурах СИД без квантовой ямы в ОПЗ и при ее наличии существенно различаются как по форме, так и по концентрации основных носителей. В гетероструктурах без квантовой ямы в ОПЗ (рис.1,*а*) наблюдаются слабо выраженные неоднородности в распределении носителей заряда со средним значением концентрации порядка  $(0,6-1,4) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . На концентрационном профиле в активной области выявляются три туннельно-связанные квантовые ямы с концентрацией носителей заряда  $(2-3,2) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . В гетероструктурах с квантовой ямой в ОПЗ (рис.1,*б*) видны четыре четко выраженные квантовые ямы, одна из которых расположена в ОПЗ. Концентрация основных носителей заряда у этого типа СИД находится в пределах  $7 \cdot 10^{17} - 1,7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

После 4 ч испытаний концентрационный профиль у СИД без квантовой ямы в ОПЗ (см. рис.1,*а*) под действием импульсного тока становится более гладким в результате перераспределения слабо связанных примесей как в ОПЗ, так и за ее пределами. При этом профиль распределения концентрации носителей заряда у СИД с квантовой ямой в ОПЗ (см. рис.1,*б*) изменился слабо: профиль несколько сместился в *n*-область структуры [2, 7].

Заметно различаются токовые зависимости внешней квантовой эффективности СИД с различной структурой активной области (рис. 2): максимум квантовой эффективности СИД с квантовой ямой в ОПЗ наблюдается при токе порядка 200 мкА, у СИД без квантовой ямы – при токе порядка 500 мкА. При этом ток, соответствующий началу свечения, у СИД с квантовой ямой гораздо меньше. Наблюдаемые отличия характеристик при низких уровнях инжекции обусловлены различием структур ОПЗ СИД двух типов. Известно [9], что при малых прямых напряжениях рекомбинация в ОПЗ протекает по механизму Шокли – Рида – Холла (ШРХ). Поскольку ширина ОПЗ  $w_1$  СИД без квантовой ямы больше, чем ширина ОПЗ  $w_2$  СИД с квантовой ямой, безызлучательная компонента тока в СИД этого типа больше. Поэтому в диапазоне малых токов внешняя квантовая эффективность СИД без квантовой ямы в ОПЗ (рис.2,*а*) меньше, чем у СИД при ее наличии (рис.2,*б*), и максимум внешней квантовой эффективности достигается при большем токе.

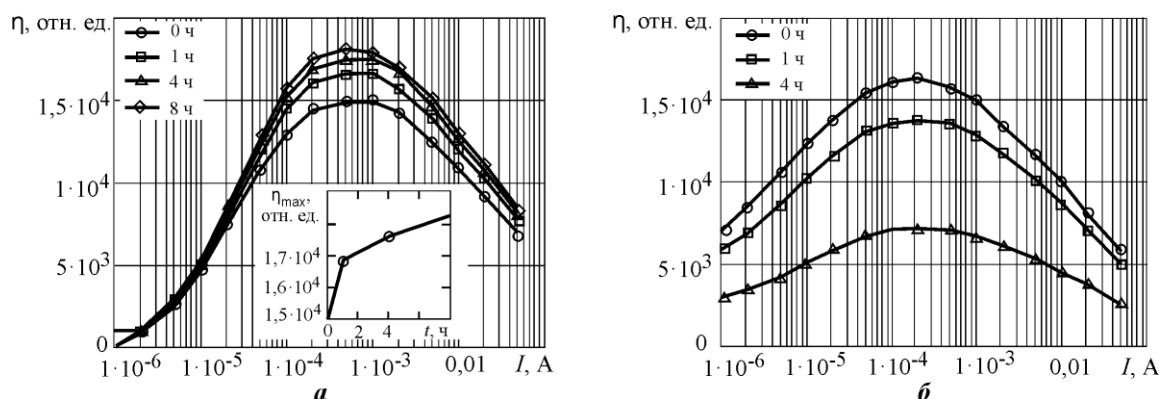


Рис.2. Токовые зависимости внешней квантовой эффективности светодиодов до и после испытаний СИД без квантовой ямы (*а*) и с квантовой ямой (*б*) в ОПЗ

В СИД без квантовой ямы в ОПЗ при низком уровне инжекции реализуется рекомбинационный механизм переноса носителей заряда, а при наличии квантовой ямы – туннельно-рекомбинационный механизм переноса носителей заряда через потенциальные барьеры на границе разрыва зон в квантовой яме. Для проверки этого предположения исследовались зависимости спектров излучения СИД при токе 2 мкА от температуры (рис. 3). Установлено, что интенсивность излучения СИД без квантовой ямы в ОПЗ (рис.3,а) при повышении температуры от 25 до 40 °С заметно снижается, а длина волны в максимуме спектра излучения остается практически неизменной. Это указывает на то, что спад мощности излучения с ростом температуры обусловлен ростом интенсивности безызлучательной рекомбинации в ОПЗ по механизму ШРХ. В СИД с квантовой ямой в ОПЗ наблюдается небольшой сдвиг спектра в красную область длин волн (рис.3,б), а интенсивность излучения при повышении температуры изменяется крайне слабо, что подтверждает туннельно-рекомбинационный механизм переноса носителей заряда при малых уровнях инжекции.

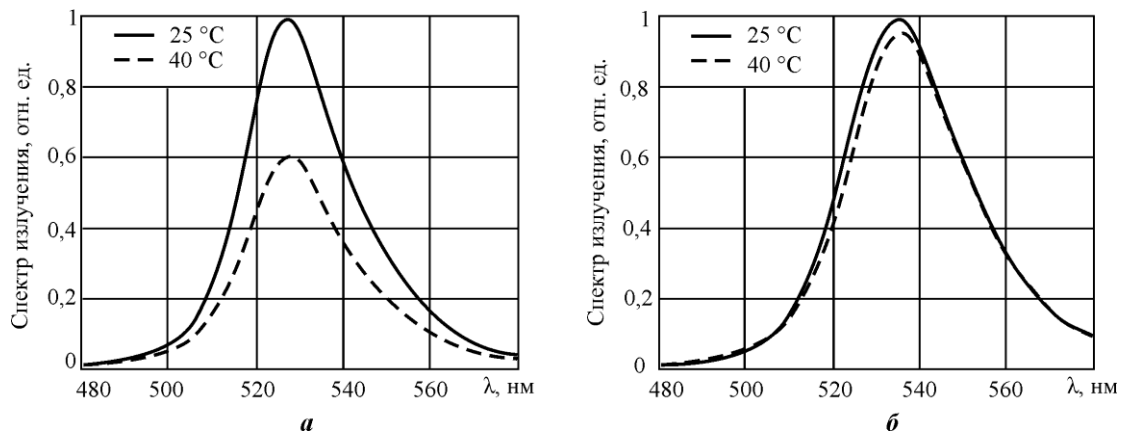


Рис.3. Спектры излучения светодиодов без квантовой ямы (а) и с квантовой ямой (б) в ОПЗ при токе 2 мкА температуры корпуса 25 и 40 °С

В диапазоне токов инжекции  $I > 1$  мА происходит спад внешней квантовой эффективности  $\eta(I)$  СИД по закону  $\eta(I) = a \cdot I^{-k}$ , где  $k$  – показатель спада. Эта зависимость типична для всех исследованных СИД, но с различными значениями показателя  $k$ . Спад внешней квантовой эффективности у СИД без квантовой ямы в ОПЗ в области токов  $I > 1$  мА подчиняется зависимости  $\eta \sim a \cdot I^{-0,5}$  как до, так и после 8 ч испытаний. У СИД с квантовой ямой в ОПЗ имеем  $\eta \sim a \cdot I^{-0,6}$  до испытаний и  $\eta \sim a \cdot I^{-0,7}$  после 4 ч испытаний. Физические механизмы, ответственные за такой характер изменения  $\eta$  при высоком уровне инжекции, до настоящего времени однозначно не установлены [3].

При прямом смещении выражение для тока, протекающего через структуру, можно записать в виде

$$I = I_{\text{рек}} + I_{\text{диф}}, \quad (1)$$

где  $I_{\text{рек}}$  – ток генерации-рекомбинации ШРХ;  $I_{\text{диф}}$  – диффузионный ток.

Ток генерации-рекомбинации определяет внешнюю квантовую эффективность преимущественно в области малых токов и прямых напряжений для исследованных СИД. При  $U < 1,9$  В наблюдается туннельно-рекомбинационная компонента тока с коэффициентом неидеальности ВАХ, превышающим 2. При  $U > 1,9$  В наблюдается спад внешней квантовой эффективности и преобладающей является диффузионная компонента тока.

Внешняя квантовая эффективность  $\eta$  СИД связана с внутренней  $\eta_{int}$  выражением

$$\eta = \eta_{int} \cdot \eta_{inj} \cdot \eta_{extr}, \quad (2)$$

где  $\eta_{inj}$  – коэффициент инжекции;  $\eta_{extr}$  – коэффициент вывода излучения из структуры.

При  $\eta_{inj} = \eta_{extr} = 1$  внешняя квантовая эффективность  $\eta_{int}$  определяется отношением времен жизни носителей заряда при излучательной  $\tau_r$  и безызлучательной  $\tau_{nr}$  рекомбинации [9]:

$$\eta = \eta_{int} = \frac{1}{1 + \tau_r / \tau_{nr}}. \quad (3)$$

Из (3) следует, что характер токовой зависимости  $\eta(I)$  и ее изменение в процессе испытаний определяется токовыми зависимостями  $\tau_r(I)$  и  $\tau_{nr}(I)$ .

Для определения характера изменения излучательной и безызлучательной компонент тока в процессе ускоренных испытаний исследована зависимость безызлучательного  $\tau_{nr}$  и излучательного  $\tau_r$  времен жизни носителей заряда от тока инжекции, полученных путем совместного измерения граничной частоты электролюминесценции и внешней квантовой эффективности исследуемых СИД в соответствии с работой [9].

При измерении зависимости граничной частоты электролюминесценции от тока через СИД пропусклся постоянный ток, на который накладывался переменный ток малой амплитуды в диапазоне частот 0,1–10 МГц. Регистрация оптического сигнала проводилась широкополосным фотоприемником с равномерной АЧХ в полосе частот до 10 МГц.

По результатам измерения частотной зависимости выходного сигнала фотоприемника определялась граничная частота  $f_{3дБ}$ , при которой мощность оптического излучения СИД равна половине значения, измеренного на низких частотах. В соответствии с [9] значение  $f_{3дБ}$  определяется временем заряда емкости СИД, временем жизни носителей заряда при безызлучательной  $\tau_{nr}$  и при излучательной  $\tau_r$  рекомбинациях. Согласно результатам измерения прямых ВФХ и ВАХ светодиодов данных типов постоянная времени  $RC$ , обусловленная зарядом диффузионной емкости СИД, составляет 5 нс и ее влиянием можно пренебречь. Поэтому для  $f_{3дБ}$  можно записать следующее выражение:

$$f_3 = \frac{\sqrt{3}}{2\pi} \left( \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_{nr}} \right). \quad (4)$$

Согласно определению внутренний квантовый выход есть отношение числа рожденных в активной области СИД фотонов к числу инжектированных в нее электронов в единицу времени и может быть рассчитан по формуле

$$\eta_{int} = \frac{P_{int} \lambda / hc}{I / e}, \quad (4)$$

где  $P_{int}$  – мощность оптического излучения из активной области СИД;  $\lambda$  – длина волны излучения;  $h$  – постоянная Планка;  $c$  – скорость света в вакууме.

Обозначив  $\frac{\lambda e}{hc \eta_{extr}} = k$  и принимая  $\eta_{extr} = 1$ , преобразуем выражение (4) к виду

$$\eta_{int} = \frac{P_{int}}{I} k. \quad (5)$$

При совместном решении уравнений (3) и (4) с учетом (5) получим выражения для расчета времени жизни носителей заряда при излучательной и безызлучательной рекомбинациях по результатам измерения мощности излучения  $P$  СИД и его граничной частоты  $f_{3\text{дБ}}$ :

$$\tau_r(I) = \frac{\sqrt{3}}{2\pi} \frac{I}{kPf_{3\text{дБ}}}; \quad (6)$$

$$\tau_{nr}(I) = \frac{\sqrt{3}}{2\pi} \frac{I}{(I - kP)f_{3\text{дБ}}}. \quad (7)$$

На рис. 4 представлены токовые зависимости времени жизни носителей заряда при излучательной  $\tau_r$  и безызлучательной  $\tau_{nr}$  рекомбинациях до и после 4 ч испытаний, рассчитанные по (6) и (7). Видно, что времена жизни носителей заряда при излучательной и безызлучательной рекомбинациях по-разному зависят от тока инжекции. Излучательное время жизни  $\tau_r$  линейно уменьшается с ростом тока и в процессе испытаний практически не изменяется у СИД как с квантовой ямой в ОПЗ, так и без нее. Существенно иной характер зависимости от тока имеет безызлучательное время жизни носителей заряда  $\tau_{nr}$  у СИД с различной структурой гетеропереходной области. У гетероструктуры без квантовой ямы в ОПЗ в области низких уровней инжекции  $\tau_{nr}$  растет с током, достигает максимума в области токов 200–500 мкА и затем уменьшается по линейному закону  $\sim I^{-1}$ . В диапазоне указанных токов внешняя квантовая эффективность достигает максимума и в дальнейшем также спадает по закону  $\sim I^{-0.5}$ . После 4 ч испытаний  $\tau_{nr}$  увеличивается и, соответственно, увеличивается внешняя квантовая эффективность СИД во всем исследованном диапазоне токов (см. рис.1,а). Токовая зависимость  $\tau_{nr}(I)$  у СИД с квантовой ямой в ОПЗ в области больших токов спадает по закону, близкому к  $\sim I^{-0.5}$ . В процессе испытаний происходит заметное уменьшение безызлучательного времени жизни и, как следствие, снижение внешней квантовой эффективности.

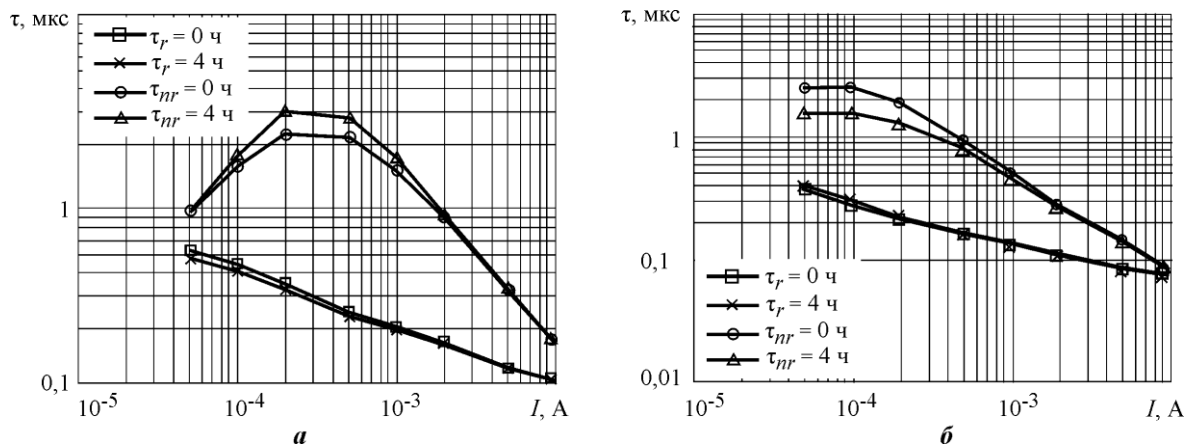


Рис. 4. Токовые зависимости излучательного и безызлучательного времени жизни носителей заряда до и после испытаний в течение 4 ч СИД без квантовой ямы (а) и с квантовой ямой (б) в ОПЗ

Одна из возможных причин уменьшения времени жизни носителей заряда при увеличении тока – уменьшение подвижности носителей заряда с ростом прямого напряжения и тока. Известно, что подвижность носителей заряда в полупроводниковых структурах пропорциональна времени жизни носителей заряда ( $\mu \sim \tau$ ) и сложным образом зависит от механизмов рассеяния и электрического режима работы структуры [9]. В

[10] показано, что в GaN- и InGaN-светодиодах при увеличении напряженности электрического поля  $E > 10^3$  В/см подвижность электронов существенно снижается, а подвижность дырок не изменяется вплоть до  $E \approx 10^5$  В/см. Такие значения напряженности поля могут вполне реализоваться в гетеропереходной структуре с квантовой ямой, в том числе и в ее области. Согласно [10] зависимость подвижности электронов в InGaN- и GaN-светодиодах от напряженности поля  $E$  можно аппроксимировать выражением

$$\mu(E) = [\mu_0 \cdot (E/E_0)^n]^{1/2}, \quad (8)$$

где  $\mu_0$  – подвижность, не зависящая от поля;  $n$  – показатель степени влияния поля (в рассматриваемом случае  $n = 0,01$ );  $E_0$  – пороговая напряженность электрического поля, при котором начинает проявляться зависимость  $\mu(E)$ .

На рис. 5 показаны экспериментальная зависимость внешней квантовой эффективности от тока инжекции  $\eta(I)$  и рассчитанная по (8) зависимость подвижности электронов от напряженности поля  $\mu(E)$  в структурах  $\text{In}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{N}$ . Видно, что эти зависимости близки по форме. Поэтому одной из возможных причин спада внешней квантовой эффективности при больших прямых напряжениях и плотностях тока может быть снижение подвижности электронов под действием высокой напряженности поля в гетероструктуре и высокой концентрации неосновных носителей заряда в квантовой яме.

Другими возможными причинами спада внешней квантовой эффективности могут быть ток утечки, возникающий за счет делокализации носителей заряда в квантовой яме с ростом уровня инжекции, несовершенство границ раздела структуры InGaN/GaN, пьезополя в квантовой яме [3, 7]. В [5] показано, что за счет уменьшения напряженности поля на гетероструктуре путем расширения активной области InGaN, введения сверхрешетки между квантовыми ямами и блокирующих потенциальных барьеров удастся уменьшить спад внешней квантовой эффективности в диапазоне больших токов.

На основе изложенного можно сделать вывод о том, что при высоком уровне инжекции рост напряженности электрического поля в гетероструктуре и концентрации носителей заряда приводит к уменьшению как подвижности, так и безызлучательного времени жизни носителей заряда и, следовательно, к спаду внешней квантовой эффективности.

Экспериментальные исследования показали, что СИД с различной структурой активной области характеризуются противоположными направлениями изменения внешней квантовой эффективности при испытании в импульсном режиме. У СИД без квантовой ямы в ОПЗ происходит непрерывный рост внешней квантовой эффективности в исследованном диапазоне токов в течение 8 ч испытаний (см. рис.2,а), а у СИД с квантовой ямой – существенное снижение (см. рис.2,б). При более длительных испытаниях у СИД с квантовой ямой в ОПЗ происходит непрерывное уменьшение интенсивности излучения вплоть до отказа, а у СИД без квантовой ямы в ОПЗ – стабилизация. Возможные причины роста внешней квантовой эффективности СИД после испытаний рассмотрены в работе [11]. Спад внешней квантовой эффективности СИД с квантовой ямой по-

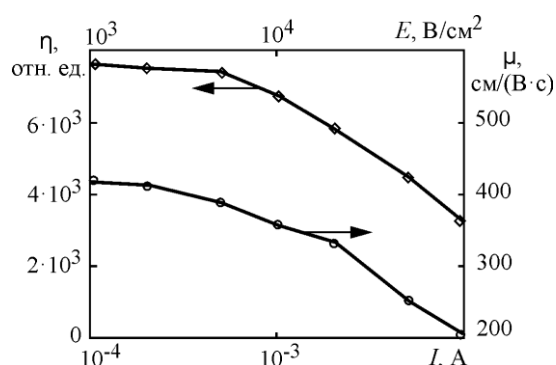


Рис.5. Зависимости подвижности электронов  $\mu$  от напряженности поля  $E$  и внешней квантовой эффективности  $\eta$  светодиода от тока  $I$  в структурах  $\text{In}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{N}$

сле испытаний вызван, вероятно, действиями пьезоэффекта и спонтанной поляризации в квантовой яме [12], которые усиливаются сильным электрическим полем ОПЗ.

Для исследования влияния форсированной импульсной токовой тренировки на стабильность светотехнических характеристик СИД при последующей их длительной работе в номинальном режиме испытаны две группы СИД по 10 штук в каждой: прошедшие импульсную токовую тренировку в течение 4 ч и не прошедшие. Испытания проводились при постоянном токе 50 мА и комнатной температуре в течение 5000 ч. В результате установлено, что группа СИД, прошедшая импульсную токовую тренировку в течение 4 ч, характеризуется средним значением уменьшения мощности излучения 1,5 % и средним квадратическим отклонением 1,4 %, а группа, не прошедшая импульсные испытания, – 2,1 и 6,4 % соответственно. Это подтверждает возможность применения форсированной импульсной токовой тренировки зеленых InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> СИД в течение 4 ч для стабилизации их светотехнических параметров и характеристик.

**Заключение.** Проведенные исследования выявили следующие закономерности.

Внешняя квантовая эффективность зеленых InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> СИД типа ARL-5213PGC-12cd в сильной степени зависит от структуры гетеропереходной области. У СИД с квантовой ямой вблизи границы ОПЗ в процессе ускоренных испытаний при повышенном импульсном токе происходит снижение внешней квантовой эффективности, а у СИД без квантовой ямы – увеличение и последующая стабилизация  $\eta(I)$ .

Токовая зависимость внешней квантовой эффективности зеленых СИД при разных уровнях инжекции определяется различными физическими процессами, протекающими в разных областях гетероструктуры InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> [3, 13]. При низком уровне инжекции основными процессами, определяющими квантовую эффективность, являются рекомбинационные процессы в ОПЗ. В гетероструктурах без квантовой ямы в ОПЗ процесс токопереноса реализуется по механизму ШРХ, а в гетероструктурах с квантовой ямой в ОПЗ – по туннельно-рекомбинационному механизму. При этом максимум внешней квантовой эффективности СИД без квантовой ямы достигается при токах больших, чем у СИД с квантовой ямой, что обусловлено различием в ширине ОПЗ и, следовательно, различием безызлучательных потерь по механизму ШРХ.

При высоком уровне инжекции спад  $\eta(I)$ , вероятно, определяется физическими процессами в квантовой яме: с ростом прямого напряжения и тока в гетероструктуре происходит уменьшение подвижности и безызлучательного времени жизни носителей заряда, а также утечка носителей из квантовой ямы вследствие их делокализации.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №16-32-60051 мол\_а\_дк.*

### Литература

1. Изучение механизмов, ответственных за деградацию эффективности светодиодов на основе нитридов третьей группы / *Н.М. Шмидт, А.С. Усиков, Е.И. Шабунина и др.* // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2015. – Т. 15. – №1. – С. 46–53.
2. Redistribution of multi-quantum well states induced by current stress in In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN light-emitting diodes / *L. Rigutti, L. Basirico, A. Cavallini et al.* // Semiconductor Science and Technology. – 2009. – Vol. 24. – P. 055015.
3. Efficiency droop in InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> blue light-emitting diodes: Physical mechanisms and remedies / *G. Verzellesi, D. Saguatti, M. Meneghini et al.* // J. of Appl. Phys. – 2013. – Vol. 114. – P. 071101.
4. *Бочкарева Н.И., Ребане Ю.Т., Шпетер Ю.Г.* Падение эффективности Ga<sub>N</sub>-светодиодов при высоких плотностях тока: туннельные токи утечки и неполная латеральная локализация носителей в квантовых ямах InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> // ФТП. – 2014. – Т. 48. – Вып. 8. – С. 1107–1116.

5. **Закгейм Д.А., Павлюченко А.С., Бауман Д.А.** Мощные синие светодиоды InGaN – пути повышения эффективности // Тез. докл. 7-й Всероссийской конф. «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы» (Москва, 1–3 февраля 2010 г.). – 2010. – С. 105–106.
6. Study on efficiency droop in InGaN/GaN light-emitting diodes based on differential carrier lifetime analysis / **X. Meng, L. Wang, Z. Hao et al.** // Appl. Phys. Lett. – 2016. – Vol. 108. – P. 013501.
7. Well-to-well non-uniformity in InGaN/GaN multiple quantum wells characterized by capacitance-voltage measurement with additional laser illumination / **T.-S. Kim, B.-J. Ahn, Y. Dong et al.** // Appl. Phys. Lett. – 2012. – Vol. 100. – P. 071910.
8. **Сергеев В. А., Фролов И. В., Широков А. А.** Автоматизированная установка для измерения вольт-фарадных характеристик гетеропереходных светодиодов с повышенным разрешением // Приборы и техника эксперимента. – 2014. – №1. – С. 137–138.
9. **Шуберт Ф.** Светодиоды. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 496 с.
10. **Piprek J., Nakamura S.** Physics of high-power InGaN/GaN lasers // IEE Proc.-Optoelectron. – 2002. – Vol. 149. – No. 4. – P. 145–151.
11. **Ковалев А.Н., Маняхин Ф.И.** Изменения люминесцентных электрических свойств светодиодов из гетероструктур InGaN/AlGaIn/GaN при длительной работе // ФТП. – 1999. – Т. 33. – Вып. 2. – С. 224–232.
12. **Наими Е.К., Никифоров, С.Г., Рабинович О.И., Сушков В.П.** Влияние ультразвуковой вибрации на деградацию светоизлучающих диодов на основе InGaN // Материалы электронной техники. – 2009. – №1. – С. 86–92.
13. **Сергеев В.А., Фролов И.В., Широков А.А.** Двухсекционная низкочастотная эквивалентная схема зеленых InGaN-светодиодов для описания шумовых характеристик // Изв. вузов. Электроника. – 2015. – Т. 20. – №6. – С. 598–606.

Поступила после доработки 10.11.2016 г.; принята к публикации 21.03.2017 г.

**Сергеев Вячеслав Андреевич** – доктор технических наук, доцент, директор Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН), заведующий базовой кафедрой радиотехники, опто- и наноэлектроники Ульяновского государственного технического университета при УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (Россия, 432071, г. Ульяновск, ул. Гончарова, д.48/2), [sva@ulstu.ru](mailto:sva@ulstu.ru).

**Фролов Илья Владимирович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (Россия, 432071, г. Ульяновск, ул. Гончарова, д.48/2), [ilya-frolov88@mail.ru](mailto:ilya-frolov88@mail.ru).

**Широков Алексей Анатольевич** – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (Россия, 432071, г. Ульяновск, ул. Гончарова, д.48/2), [ufire@mv.ru](mailto:ufire@mv.ru).

**Радаев Олег Александрович** – аспирант кафедры радиотехники, опто- и наноэлектроники Ульяновского государственного технического университета, младший научный сотрудник УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (Россия, 432071, г. Ульяновск, ул. Гончарова, д.48/2), [oleg.radaev.91@mail.ru](mailto:oleg.radaev.91@mail.ru).

## References

1. Shmidt N.M., Usikov A.S., Shabunina E.I. i dr. Izuchenie mekhanizmov, otvetstvennykh za degradatsiyu ehffektivnosti svetodiodov na osnove nitridov tret'ej gruppy [The investigation of the mechanisms responsible for the degradation of the efficiency of the LEDs based on III-nitrides group]. *Nauchno-tehnicheskij vestnik informatsionnykh tekhnologij, mekhaniki i optiki – Scientific and technical journal of information technologies, mechanics and optics*, 2015, vol. 15, no.1, pp. 46–53. (In Russian).
2. Rigutti L., Basirico L., Cavallini A. et al. Redistribution of multi-quantum well states induced by current stress in  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N/GaN}$  light-emitting diodes. *Semiconductor Science and Technology*, 2009, vol. 24, p. 055015.

3. Verzellesi G., Saguatti D., Meneghini M. et al. Efficiency droop in InGaN/GaN blue light-emitting diodes: Physical mechanisms and remedies. *J. of Appl. Phys.*, 2013, vol. 114, p. 071101.
4. Bochkareva N.I., Rebane YU.T., SHreter YU.G. Padenie ehffektivnosti GaN-svetodiodov pri vysokikh plotnostyakh toka: tunnel'nye toki utechki i nepolnaya lateral'naya lokalizatsiya nositelej v kvantovykh yamakh InGaN/GaN [The decrease in the efficiency of GaN-based LEDs at high current density: the tunneling leakage currents and partial lateral localization of carriers in quantum wells InGaN/GaN]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov – Physics and Techniques of Semicon*, 2014, vol. 48, no. 8, pp. 1107–1116. (In Russian).
5. Zakgejm D.A., Pavlyuchenko A.S., Bauman D.A. Moshhnye sinie svetodiody InGaN – puti povysheniya ehffektivnosti [High-power blue InGaN-based LEDs - the ways to improve]. *Tez. dokl. 7-j Vserossiyskoj konf. «Nitridy galliya, indiya i aliuminiya – struktury i pribory»* [Gallium, aluminum and indium nitrides. Abstracts of the 7th All-Russian Conference]. Moscow, 2010, pp. 105–106. (In Russian).
6. Meng X., Wang L., Hao Z. et al. Study on efficiency droop in InGaN/GaN light-emitting diodes based on differential carrier lifetime analysis. *Appl. Phys. Lett.*, 2016, vol. 108, p. 013501.
7. Kim T.-S., Ahn B.-J., Dong Y. et al. Well-to-well non-uniformity in InGaN/GaN multiple quantum wells characterized by capacitance-voltage measurement with additional laser illumination. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, vol. 100, p. 071910.
8. Sergeev V. A., Frolov I. V., SHirokov A. A. Avtomatizirovannaya ustanovka dlya izmereniya vol't-faradnykh kharakteristik geteroperekhodnykh svetodiodov s povyshennym razresheniem [Automated installation for measuring the capacitance-voltage characteristics of the heterojunction LEDs with high resolution]. *Pribory i tekhnika ehksperimenta – Instruments and Experimental Techniques*, 2014, no.1, pp. 137–138. (In Russian).
9. Shubert F. *Svetodiody* [Light-emitting diodes]. Moscow, Fizmatlit, 2008, 496 p. (In Russian).
10. Piprek J., Nakamura S. Physics of high-power InGaN/GaN lasers. *IEEE Proc.-Optoelectron*, 2002, vol. 149, no. 4, pp. 145–151.
11. Kovalev A.N., Manyakhin F.I. Izmeneniya lyuminestsentnykh ehlektricheskikh svoystv svetodiodov iz geterostruktur InGaN/AlGaIn/GaN pri dlitel'noj rabote [The changes of the fluorescent and electrical properties of LEDs based on heterostructures InGaN/AlGaIn/GaN after prolonged use]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov – Physics and Techniques of Semiconductors*, 1999, vol. 33, no. 2, pp. 224–232. (In Russian).
12. Naimi E.K., Nikiforov, S.G., Rabinovich O.I., Sushkov V.P. Vliyanie ul'trazvukovoj vibratsii na degradatsiyu svetoizluchayushhih diodov na osnove InGaIn [Effect of ultrasonic vibration on the degradation of the light-emitting diode based on InGaIn]. *Materialy ehlektronnoj tekhniki – Materials of Electronic Technology*, 2009, no.1, pp.86–92. (In Russian).
13. Sergeev V.A., Frolov I.V., SHirokov A.A. Dvukhseksionnaya nizkochastotnaya ehkvivalentnaya skhema zelenykh InGaIn-svetodiodov dlya opisaniya shumovykh kharakteristik [Double Stage Low Frequency Noise Equivalent Circuit of Green InGaIn LEDs for Description of Noise Characteristics] // *Izvestiy vuzov. Elektronika – Proceedings of universities. Electronics*, 2015, vol. 20, no.6, pp. 598–606. (In Russian).

Submitted 10.11.2016; accepted 21.03.2017.

**Вниманию читателей журнала  
«Известия высших учебных заведений. Электроника»**

Оформить годовую подписку на электронную  
копию журнала можно на сайтах

- **Научной электронной библиотеки:** [www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru)
- **ООО «Агентство «Книга-Сервис»:** [www.rucont.ru](http://www.rucont.ru); [www.akc.ru](http://www.akc.ru);  
[www.pressa-rf.ru](http://www.pressa-rf.ru)
- **Урал-Пресс:** [www.delpress.ru](http://www.delpress.ru)