

УДК 621.382

## О СВЯЗИ ЛОКАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ЗЕЛЕННЫХ InGaN СВЕТОДИОДОВ С ПАРАМЕТРАМИ ВОЛЬТ- АМПЕРНЫХ И ШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В ДИАПАЗОНЕ ТОКОВ НАЧАЛА СВЕЧЕНИЯ

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

<sup>1</sup> Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники РАН,  
432071, г. Ульяновск, ул. Гончарова, д. 48/2

<sup>2</sup> Ульяновский государственный технический университет,  
432027, г. Ульяновск, ул. Северный венец, д. 32

Статья поступила в редакцию 7 октября 2019 г.

**Аннотация.** Представлена модель связи крутизны  $K$  ватт-амперной характеристики светодиода, измеренной в диапазоне микротоков, с концентрацией дефектов в гетероструктуре светодиода. Согласно модели более дефектной является структура, свечение которой возникает при большем токе. Ватт-амперная характеристика таких светодиодов имеет большую крутизну. Выполнена экспериментальная проверка корреляционной связи среднего значения и степени неоднородности распределения параметра  $K$  по площади кристалла со степенью дефектности гетероструктуры на примере коммерческих InGaN светодиодов зеленого свечения. Степень дефектности гетероструктуры оценивалась косвенным способом по уровню низкочастотного шума  $S_I$  и коэффициенту неидеальности вольт-амперной характеристики  $m$ . Профиль распределения крутизны ватт-амперных характеристик по кристаллу светодиода определялся как отношение интенсивностей изображений кристалла при токах 500 нА и 5 мкА, полученных цифровой камерой микроскопа Levenhuk D320L. Оценка неоднородности распределения крутизны ватт-амперной характеристики выполнялась на основе среднего квадратического отклонения  $\sigma$ , нормированного на среднее значение параметра  $K_{cp}$  по кристаллу. Определена сильная корреляционная связь между параметрами  $K_{cp} - S_I$  и  $K_{cp} - m$  (коэффициент корреляции  $\rho$  составляет 0,93 и 0,89 соответственно) и слабая

корреляционная связь между параметрами  $\sigma/K_{cp} - m$  ( $\rho = 0,42$ ). Полученные результаты могут быть использованы для выявления локальных областей кристаллов светодиодов с повышенной дефектностью.

**Ключевые слова:** InGaN светодиод, электролюминесценция, ватт-амперная характеристика, крутизна характеристики, вольт-амперная характеристика, низкочастотный шум, корреляция.

**Abstract.** A model of the relationship between the steepness  $K$  of the  $P-I$  characteristic of the LED measured in the microcurrent range and the defects concentration in the heterostructure of the LED is presented. According to the model, the higher the current causing the luminescence, the more defective is the structure. The  $P-I$  characteristic of such LEDs has a large steepness. An experimental verification of the correlation between the average value and the heterogeneity degree of the  $K$  parameter distribution over the chip area with the defectness degree of the heterostructure using commercial InGaN green LEDs was carried out. The degree of the heterostructure defectness was estimated indirectly by the low-frequency noise level  $S_I$  and the non-ideality coefficient of the  $I-V$  characteristic  $m$ . The distribution profile of the steepness of the  $P-I$  characteristics over the LED chip was determined as the ratio of the intensities of the chip images at currents of 500 nA and 5  $\mu$ A obtained by a Levenhuk D320L digital microscope camera. The inhomogeneity of the steepness distribution of the  $P-I$  characteristic was estimated based on the mean square deviation  $\sigma$  normalized to the average value of the parameter  $K_{av}$  over the chip. We determined a strong correlation between the parameters  $K_{av} - S_I$  and  $K_{av} - m$  (the correlation coefficient  $\rho$  is 0.93 and 0.89, respectively) and a weak correlation between the parameters  $\sigma/ K_{av} - m$  ( $\rho = 0.42$ ). The results can be used for identification local areas of LED chip with increased defectness.

**Key words:** InGaN-based LED, electroluminescence,  $P-I$  characteristic, steepness of the characteristic,  $I-V$  characteristics, low-frequency noise, correlation.

## Введение

Фундаментальным свойством светоизлучающих гетероструктур на основе InGaN является пространственная неоднородность оптических свойств,

обусловленная флуктуациями состава твердого раствора InGaN и присутствием системы протяженных дефектов, пронизывающих материал [1, 2]. Известно, что неоднородность распределения параметров электролюминесценции (ЭЛ) по площади кристалла определяется двумя факторами: неоднородностью распределения центров безызлучательной рекомбинации, которые формируют локальные области с низкой интенсивностью излучения, и локальным скоплением атомов индия в твердом растворе InGaN и формирующих локальные области с высокой интенсивностью и большей длиной волны излучения. Неоднородное распределение центров излучательной и безызлучательной рекомбинации в гетероструктуре является причиной неоднородного распределения плотности тока, температуры и интенсивности электролюминесценции. Локальное увеличение плотности тока в процессе работы приводит к локальному разогреву структуры, что в свою очередь является причиной увеличения темпа деградации гетероструктуры. В этой связи актуальной является задача выявления связи неоднородности состава твердого раствора InGaN со статическими и динамическими параметрами ЭЛ и разработка средств косвенной оценки дефектности светоизлучающих InGaN/GaN гетероструктур.

Цель работы заключалась в экспериментальной проверке корреляционной связи среднего значения и степени неоднородности пространственного распределения крутизны ватт-амперной характеристики с параметрами вольт-амперных характеристик (ВАХ) и уровнем низкочастотного (НЧ) шума зеленых InGaN светодиодов при малых токах, соответствующих началу свечения структуры.

### **1. Модель связи концентрации дефектов с крутизной ватт-амперной характеристики**

В соответствии с рекомбинационной моделью величина тока в гетероструктуре определяется выражением [3]

$$I = qV(An + Bn^2 + Cn^3), \quad (1)$$

где  $q$  – заряд электрона;  $V$  – объем активной области;  $A$  – коэффициент

безызлучательной рекомбинации по механизму Шокли-Рида-Холла (ШРХ);  $B$  – коэффициент излучательной рекомбинации;  $C$  – коэффициент Оже-рекомбинации;  $n$  – концентрация носителей заряда в активной области.

Мощность оптического излучения, выходящего за пределы светодиода, прямо пропорциональна скорости излучательной рекомбинации  $Bn^2$ :

$$P = \eta_{extr} V \frac{hc}{\lambda} Bn^2, \quad (2)$$

где  $\eta_{extr}$  – коэффициент оптического вывода излучения, не зависящий от величины тока  $I$ ;  $h$  – постоянная Планка;  $c$  – скорость света;  $\lambda$  – длина волны излучения.

Из выражения (2) следует, что отношение значений мощности излучения светодиода, измеренных при двух токах (при двух значениях концентрации носителей заряда), определяется квадратом отношения концентрации носителей заряда в гетероструктуре:

$$K = \frac{P_2}{P_1} = \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^2. \quad (3)$$

С другой стороны, рекомбинационные коэффициенты определяют времена жизни носителей заряда при излучательной  $\tau_r$  и безызлучательной  $\tau_{nr}$  рекомбинации:

$$\tau_r = \frac{1}{2Bn}, \quad (4)$$

$$\tau_{nr} = \frac{1}{A + 3Cn^2}, \quad (5)$$

которые связаны с дифференциальным временем жизни носителей заряда  $\tau$  выражением

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_{nr}} = A + 2Bn + 3Cn^2. \quad (6)$$

Измерение времени  $\tau$  проводится либо методом импедансной спектроскопии путем измерения действительной и мнимой частей импеданса светодиода [4] или фазового сдвига между переменными составляющими тока и оптического излучения [5], либо  $\tau$  определяется как величина, обратно

пропорциональная граничной частоте модуляции электролюминесценции светодиода  $f_{3дБ}$  [6, 7]:

$$\tau = \frac{\sqrt{3}}{2\pi f_{3дБ}}. \quad (7)$$

Известно, что при малых токах влиянием Оже-рекомбинации можно пренебречь ( $Cn^3 \approx 0$ ). В этом случае можно составить систему уравнений для двух значений дифференциального времени жизни носителей заряда  $\tau$ , измеренных при двух токах инжекции (при двух значениях концентрации носителей заряда в активной области):

$$\begin{cases} \tau_1 = (A + 2Bn_1)^{-1}, \\ \tau_2 = (A + 2Bn_2)^{-1}. \end{cases} \quad (8)$$

Решая совместно (3) и (8) и учитывая, что  $\eta_{int} = \tau_{nr}/(\tau_r + \tau_{nr})$ , получаем выражение для определения коэффициента безызлучательной рекомбинации Шокли-Рида-Холла

$$A = \frac{1}{\tau_1} \left( 1 - \frac{\frac{\tau_1 - 1}{\tau_2}}{\sqrt{K} - 1} \right) \quad (9)$$

Коэффициент безызлучательной рекомбинации ШРХ прямо пропорционален концентрации дефектов  $N_T$  [7, 8]:

$$A = \sigma \cdot v \cdot N_T, \quad (10)$$

где  $\sigma$  – сечение захвата;  $v$  – тепловая скорость носителей заряда.

Таким образом, между плотностью дефектов  $N_T$  в структуре и коэффициентом  $K = P_2/P_1$ , характеризующим крутизну ватт-амперной характеристики светодиода, существует пропорциональная зависимость:

$$N_T = \frac{1}{\sigma v \tau_1} \left( \frac{\sqrt{K} - \frac{\tau_1}{\tau_2}}{\sqrt{K} - 1} \right) = \frac{1}{\sigma v \tau_1} \left( \frac{\sqrt{\frac{P_2}{P_1}} - \frac{\tau_1}{\tau_2}}{\sqrt{\frac{P_2}{P_1}} - 1} \right). \quad (11)$$

Соответственно

$$K = \frac{P_2}{P_1} = \left( \frac{\frac{\tau_1}{\tau_2} - N_T \sigma v \tau_1}{1 - N_T \sigma v \tau_1} \right)^2. \quad (12)$$

Поскольку при увеличении тока в структуре время жизни носителей заряда уменьшается [4], функция  $K(N_T)$  является возрастающей. На наш взгляд, полученную зависимость можно объяснить следующим образом. При малых токах, соответствующих диапазону токов начала свечения структуры, скорость безызлучательной рекомбинации по механизму ШРХ  $An$  в значительной степени преобладает над скоростью излучательной рекомбинации  $Bn^2$ . При увеличении тока (концентрации носителей заряда  $n$ ) эта разница уменьшается. Следовательно, различие в мощности излучения двух светодиодов, характеризующихся разными значениями концентрации дефектов  $N_T$ , при меньшем токе  $I_1$  проявляется значительнее, чем при большем токе  $I_2$  (рис. 1).

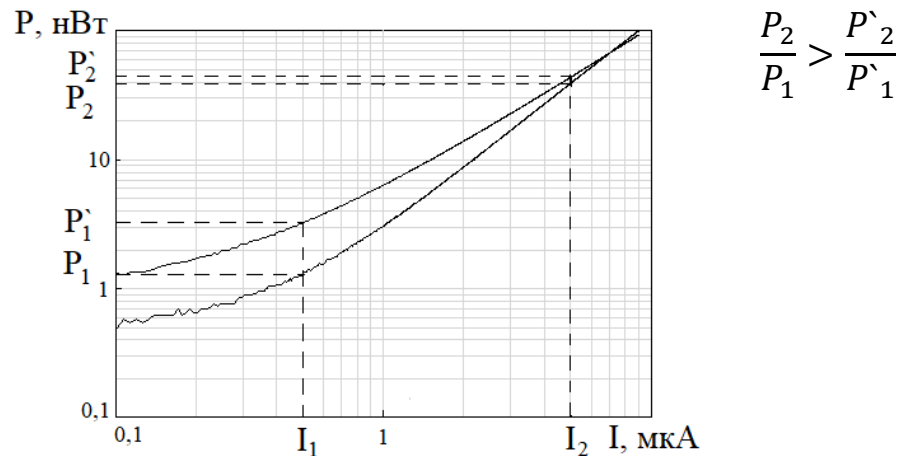


Рис. 1. Ватт-амперные характеристики двух светодиодов с разным значением  $K$ .

Это значит, что крутизна ватт-амперной характеристики светодиода в диапазоне токов начала свечения в большей степени зависит от скорости безызлучательной рекомбинации: чем больше степень дефектности структуры (больше  $N_T$ ), тем меньше значение  $P_1$  и тем больше крутизна ватт-амперной характеристики.

## 2. Экспериментальные результаты

Оценка степени дефектности структуры готового полупроводникового прибора, как правило, проводится косвенными методами по интегральным электрофизическим характеристикам. Чувствительными к дефектам светоизлучающих гетероструктур являются, в частности, вольт-амперные характеристики и токовые зависимости уровня НЧ шума [9, 10], параметры которых коррелируют с темпом деградации светодиодов под действием прямого тока.

Экспериментальная проверка связи крутизны ватт-амперной характеристики и степени неоднородности ее пространственного распределения по площади кристалла светоизлучающего прибора с параметрами ВАХ и уровнем НЧ шума выполнена на примере коммерческих InGaN светодиодов зеленого свечения. По результатам измерений прямого тока светодиодов при напряжении 1,9 В из исходной выборки объемом 50 шт. выбраны 8 шт. светодиодов с различным значением прямого тока в пределах от наименьшего до наибольшего.

Для измерения профиля распределения ЭЛ по площади кристалла светодиодов использовался микроскоп Levenhuk D320L с увеличением до 1600х, имеющий в своем составе цифровую камеру C310T NG с максимальным разрешением 2048x1536 [11]. Ток светодиода задавался высокостабильным источником питания АКПП 1113. Измерения профиля пространственного распределения интенсивности ЭЛ выполнялись при токах  $I_1 = 500$  нА и  $I_2 = 5$  мкА путем многократного сохранения снимков кристалла светодиода и последующего усреднения. Время выдержки цифровой камеры устанавливалось в диапазоне 2 мс – 2 с таким образом, чтобы среднее значение яркости изображения находилось на линейном участке яркостной характеристики камеры. Для каждого пикселя изображения рассчитывалось значение параметра  $K = P_2/P_1$ . Для обеспечения максимальной чувствительности параметра  $K$  к степени дефектности структуры значение тока  $I_1$  выбиралось минимальным, при котором уверенно регистрировалось

изображение кристалла при максимальном времени выдержки. Ток  $I_2$  выбирался максимальным, при котором обеспечивался линейный диапазон яркостной характеристики камеры.

На рис. 2 представлено изображение кристалла светодиода из исследованной выборки (а) и профиль распределения параметра  $K$  по площади кристалла (б).



Рис. 2. Изображение кристалла светодиода (а) и профиль распределения параметра  $K$  по площади кристалла (б):  $K_{CP} = 88$ ;  $\sigma = 7$ ;  $\sigma/K_{CP} = 8,1 \%$ .

Оценка неоднородности распределения крутизны ватт-амперной характеристики выполнялась на основе расчета относительного среднего квадратического отклонения (СКО)  $\sigma/K_{CP}$  (%) путем вычисления СКО  $\sigma$  и среднего значения  $K_{CP}$  по кристаллу. Результаты измерений представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры распределения крутизны ватт-амперной характеристики по площади кристалла зеленых светодиодов.

№ светодиода	$K_{CP}$ , отн. ед.	$\sigma$ , отн. ед.	$\sigma/K_{CP} \cdot 100, \%$
1	27	0,7	2,7
2	35	1,6	4,5
3	42	2,3	5,5
4	62	1,4	2,2
5	72	2,3	3,2
6	65	2,3	3,5
7	80	3,0	3,7
8	88	7,1	8,1

Согласно данным табл. 1, среднее значение параметра  $K_{CP}$  по выборке составляет  $\overline{K_{CP}} = 59$ , а среднее квадратическое отклонение 22.

По результатам выборочных измерений определено, что значение параметра  $K_{CP}$  сильно коррелирует со значением коэффициента неидеальности ВАХ  $m$  светодиода, рассчитанного путем дифференцирования ВАХ на участке 0,5...5 мкА ( $\rho = 0,89$ ), и со значением среднего квадрата шумового тока ( $\rho = 0,93$ ),



измеренного при токе 20 мкА на частоте 1 кГц на измерительной установке, представленной в [12]. Поле корреляции указанных величин представлены на рис. 3 и рис. 4 соответственно.

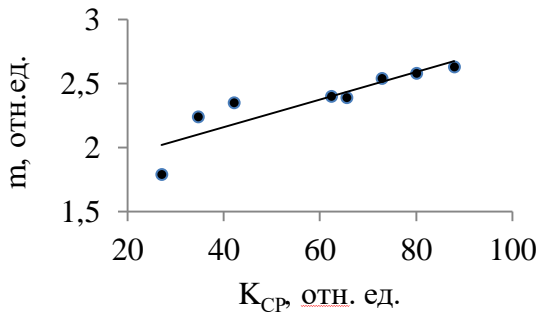


Рис. 3. Корреляция величины  $K_{CP}$  и коэффициента неидеальности ВАХ

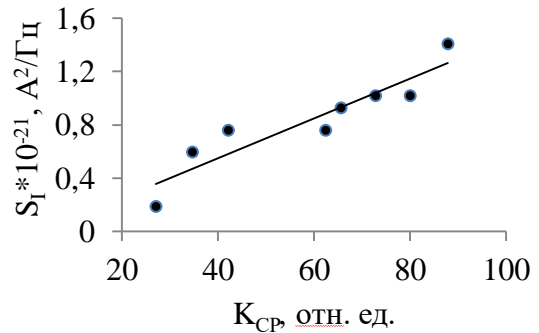


Рис. 4. Корреляция величины  $K_{CP}$  и среднего квадрата шумового тока

Значение нормированного СКО  $\sigma/K_{cp}$ , характеризующего степень неоднородности распределения параметра  $K$  по площади кристалла, слабо коррелирует с коэффициентом неидеальности ВАХ ( $\rho = 0,42$ ). Однако светодиоды с наибольшим и наименьшим значением  $m$  в пределах исследованной выборки имеют соответственно наибольшее и наименьшее значение  $\sigma/K_{cp}$  (рис. 5).

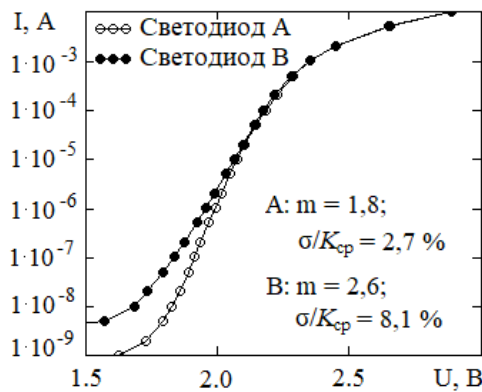


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики двух светодиодов исследованной выборки.

Полученные результаты согласуются с результатами, полученными в [13] для зеленых коммерческих InGaN светодиодов другого типа.

### Заключение

Теоретически показано, что крутизна ватт-амперной характеристики светодиода в диапазоне токов начала свечения функционально связана с концентрацией дефектов в гетероструктуре. Экспериментально подтверждена

корреляционная связь указанного параметра с коэффициентом неидеальности ВАХ и уровнем НЧ шума светодиода, которые используются для косвенной оценки степени дефектности структуры. Полученные результаты свидетельствуют о том, что локальные статические параметры электролюминесценции светодиода могут быть использованы в целях диагностики как параметры, характеризующие качество гетероструктуры.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-07-00562 А.

### Литература

1. Characteristics of GaN-based light emitting diodes with different thicknesses of buffer layer grown by HVPE and MOCVD / P. Tian, P. R. Edwards, M. J. Wallace et al. // Journal of Physics D: Applied Physics. 2017. V. 50. P. 075101.
2. High spatial uniformity of photoluminescence spectra in semipolar (  $20^\circ$  ) plane InGaN/GaN quantum wells / K. Gelžinytė, R. Ivanov, S. Marcinkevičius et al. // Journal of Applied Physics. – 2015. V. 117. P. 023111.
3. Differential carrier lifetime in InGaN-based light-emitting diodes obtained by small-signal frequency-domain measurements / I. Reklaitis, F. Nippert, R. Kudzma et al. // Journal of Applied Physics. 2017. V. 121. P. 035701.
4. Meneghini M., Trivellin N., Meneghesso G. A combined electro-optical method for the determination of the recombination parameters in InGaN-based light-emitting diodes // Journal of Applied Physics. 2009. V. 106. P. 114508.
5. David A., Grundmann M. J. Droop in InGaN light-emitting diodes: A differential carrier lifetime analysis // Applied Physics Letters. 2010. V. 96. P. 103504.
6. GaN-based LEDs for light communication / L. X. Zhao, S. C. Zhu, C. H. Wu et al. // Sci.China-Phys. Mech. Astron. 2016. V. 59. P. 107301.
7. Шуберт Ф. Светодиоды. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008.
8. Lin-Wang Xu and Ke-Yuan Qian A Fast Method for Lifetime Estimation of Blue Light-Emitting Diode Chips Based on Nonradiative Recombination Defects // IEEE Photonics Journal. 2017. Vol. 9, No. 4. P. 8201309.

9. Изучение механизмов, ответственных за деградацию эффективности светодиодов на основе нитридов третьей группы / Шмидт Н.М. и др. // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 1. С. 46.
10. J. Glemža, J. Matukas, S. Pralgauskaitė, and V. Palenskis. Low-frequency noise characteristics of high-power white led during long-term aging experiment // Lithuanian Journal of Physics. 2018. Vol. 58, No. 2. – P. 194-203.
11. Frolov I. V., Radaev O. A., Sergeev V. A. Measurement and analysis of the recombination coefficients distribution on the area of light-emitting InGaN/GaN heterostructures // Book of Abstracts. 6th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures «Saint Petersburg OPEN 2019». St Petersburg, Russia, April 22–25, 2019. St. Petersburg Academic University, 2019. P. 242-243.
12. Сергеев, В. А. Двухсекционная низкочастотная эквивалентная схема зеленых InGaN светодиодов для описания шумовых характеристик / В. А. Сергеев, И. В. Фролов, А. А. Широков // Известия вузов. Электроника. 2015. Т. 20, №6. С. 598-606.
13. Фролов И. В., Радаев О. А., Сергеев В. А. Оценка связи пространственной неоднородности электролюминесценции светодиодных структур с параметрами вольтамперной характеристики // «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика» : Сборник трудов XIX Всерос. конф. молодых ученых. – Саратов : Изд-во «Техно-Декор». 2019. С. 278-279.

**Для цитирования:**

И. В. Фролов, О. А. Радаев, А. А. Гавриков, В. А. Сергеев. О связи локальных параметров электролюминесценции зеленых InGaN светодиодов с параметрами вольт-амперных и шумовых характеристик в диапазоне токов начала свечения. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 10. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/oct19/5/text.pdf>  
DOI 10.30898/1684-1719.2019.10.5