

## Исследование связи концентрации дефектов светоизлучающих InGaN/GaN гетероструктур с параметрами ватт-амперной характеристики

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

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

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

e-mail: ilya-frolov88@mail.ru

Поступила в редакцию 03.05.2024 г.

В окончательной редакции 25.07.2024 г.

Принята к публикации 30.10.2024 г.

Показано, что параметр функции, аппроксимирующей ватт-амперную характеристику светодиода InGaN/GaN в диапазоне малых токов, определяющий степень нелинейности ватт-амперной характеристики, обратно пропорционален корню квадратному из концентрации дефектов гетероструктуры. Эта зависимость подтверждена экспериментально установленными сильными корреляционными связями указанного параметра с уровнем низкочастотного шума светодиодов и параметрами неоднородности свечения гетероструктур в режиме микроплазменного пробоя. Указанный параметр может использоваться для оценки дефектности светоизлучающих гетероструктур.

**Ключевые слова:** светоизлучающая гетероструктура, концентрация дефектов, ватт-амперная характеристика, низкочастотный шум, микроплазменный пробой.

DOI: 10.61011/OS.2024.11.59499.6556-24

Для светоизлучающих гетероструктур InGaN/GaN с множественными квантовыми ямами характерно наличие микродефектов различного рода (кластеров In, дислокаций, вакансий и т.д.) в активной области, что является причиной ускорения деградации светодиодов на их основе при эксплуатации [1,2]. Существующие методы диагностики светодиодов по вольтамперной характеристике, световому потоку, цветовой температуре, тепловому сопротивлению и т.д. [3,4] не позволяют эффективно выявлять светодиоды с повышенной концентрацией микродефектов, которые не проявляются на указанных характеристиках при контроле, но при эксплуатации приводят к ускорению деградационных процессов.

В связи с этим актуальной задачей является поиск информативных параметров, позволяющих оценивать степень дефектности светоизлучающих гетероструктур. Цель настоящей работы заключалась в определении возможности оценки степени дефектности светоизлучающей гетероструктуры InGaN/GaN по параметру функции, аппроксимирующей ватт-амперную характеристику светодиодов в диапазоне малых токов.

Для аппроксимации ватт-амперной характеристики светодиода в диапазоне малых токов, при которых действием оже-рекомбинации можно пренебречь, в работе [5] на основе ABC модели рекомбинации носителей заряда в гетероструктуре получена функция

$$P(I) = \frac{m}{2} (\sqrt{1 + 2qI} - 1)^2, \quad (1)$$

где коэффициенты  $m$  и  $q$  связаны с рекомбинационными параметрами светоизлучающей структуры.

В работе [5] также показано, что коэффициент  $q$ , определяющий степень нелинейности ватт-амперной характеристики, прямо пропорционален коэффициенту излучательной рекомбинации  $B$  и обратно пропорционален квадрату коэффициента  $A$  безызлучательной рекомбинации:

$$q = \frac{\eta_{inj}}{eV} \frac{2B}{A^2}, \quad (2)$$

где  $\eta_{inj}$  — коэффициент инжекции носителей заряда в активную область,  $e$  — элементарный заряд,  $V$  — объем активной области гетероструктуры.

Параметр  $m$  рассчитывается по формуле

$$m = \eta_{extr} V \frac{hc}{\lambda} \frac{A^2}{2B}, \quad (3)$$

где  $\eta_{extr}$  — коэффициент оптического вывода излучения,  $h$  — постоянная Планка,  $c$  — скорость света,  $\lambda$  — длина волны излучения.

При уменьшении  $q$  степень нелинейности функции (1) увеличивается, и при  $2qI \ll 1$

$$P(I) \approx \frac{m}{2} q^2 I^2.$$

При увеличении  $q$  функция (1) приближается к линейной, и при  $2qI \gg 1$

$$P(I) \approx mqI.$$

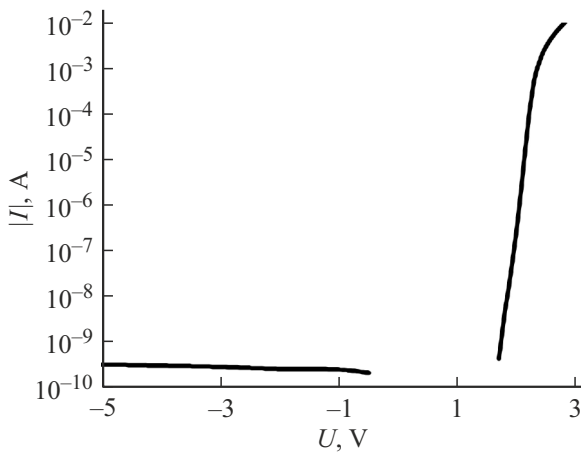


Рис. 1. Вольтамперная характеристика светодиода исследованного типа.

В свою очередь, как показано в работе [6], коэффициент безызлучательной рекомбинации  $A$  пропорционален концентрации центров захвата носителей заряда (дефектов):  $A \sim N_T$ . Таким образом, концентрация дефектов  $N_T$  и параметр  $q$  связаны зависимостью вида

$$N_T \sim 1/\sqrt{q}. \tag{4}$$

Для подтверждения полученной модельной зависимости (3) нами проводилась косвенная оценка степени дефектности светоизлучающих гетероструктур по параметрам низкочастотного (НЧ) шума светодиода и параметрам неоднородности свечения гетероструктуры в режиме микроплазменного (МП) пробоя. Параметры НЧ шума благодаря их высокой чувствительности к неоднородностям и дефектам структуры могут использоваться для диагностики качества полупроводниковых изделий, в том числе на основе светоизлучающих гетероструктур [7–10]. В [9,10] показано, что при малых токах (порядка десятков  $\mu A$ ) средний квадрат шумового тока светодиода прямо пропорционален концентрации дефектов гетероструктуры:  $S_I \sim N_T$ . В работе [11] показано, что в режиме МП пробоя свечение структуры возникает в областях с повышенной концентрацией дефектов.

Исследование выполнено на выборке из 75 штук коммерческих зеленых светодиодов InGaN/GaN типа TO-3216BC-PG. Размеры кристалла светодиодов составляют  $200 \times 130 \mu m$ , длина волны, соответствующая максимуму спектра излучения, равна 525 nm при токе 20 mA, внешний квантовый выход излучения при токе 20 mA (плотность тока  $77 A/cm^2$ ) равен 0.1, а максимальное значение достигается при токе  $50 \mu A$  (плотность тока  $0.19 A/cm^2$ ) и равно 0.2. Вольтамперная характеристика одного из светодиодов исследованной выборки приведена на рис. 1. В диапазоне обратных напряжений до  $-5 V$  обратный ток не превышает 0.5 nA.

Измерения ватт-амперных характеристик в диапазоне токов от  $1 \mu A$  до 1 mA проводились измерителем поро-

гового тока светодиодов [12]. Сигнал на выходе фотоприемного устройства, входящего в состав измерителя, пропорциональный мощности оптического излучения светодиода, измерялся 16-разрядным аналого-цифровым преобразователем (АЦП). Значения мощности излучения светодиода выражались в относительных единицах, приведенных к максимальному значению сигнала на выходе АЦП.

Параметр  $q$  определяли путем аппроксимации результатов измерений функций (1) методом наименьших квадратов. У светодиодов исследованной выборки параметр  $q$  менялся в диапазоне от 30746 до  $62026 A^{-1}$ , при этом среднее значение составило  $45937 A^{-1}$ .

На рис. 2 показаны ватт-амперные характеристики светодиодов № 1 и № 2 с существенно различающимся значением параметра аппроксимирующей функции  $q$ . При малых токах ватт-амперная характеристика светодиода № 1 имеет большую крутизну, чем ватт-амперная характеристика светодиода № 2.

Спектральную плотность мощности (СПМ) НЧ шумового тока  $S_I$  измеряли аппаратно-программным комплексом, описанным в [13], реализующим метод удвоения мощности: через светодиод, подключенный через согласующий трансформатор к селективному нановольтметру Униран-233, пропускался постоянный ток  $20 \mu A$ , а установившиеся за время интегрирования (порядка 10 s)

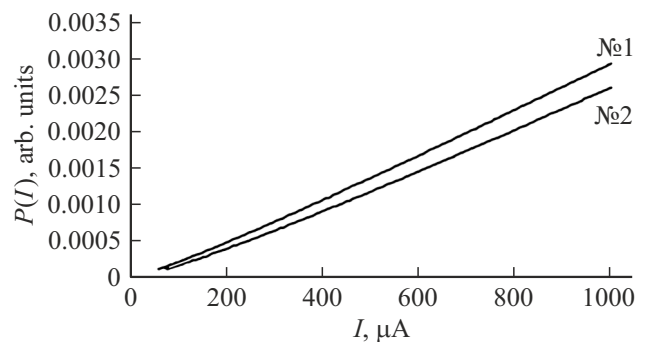


Рис. 2. Ватт-амперные характеристики двух светодиодов: № 1 —  $q = 62026 A^{-1}$ , № 2 —  $q = 30746 A^{-1}$ .

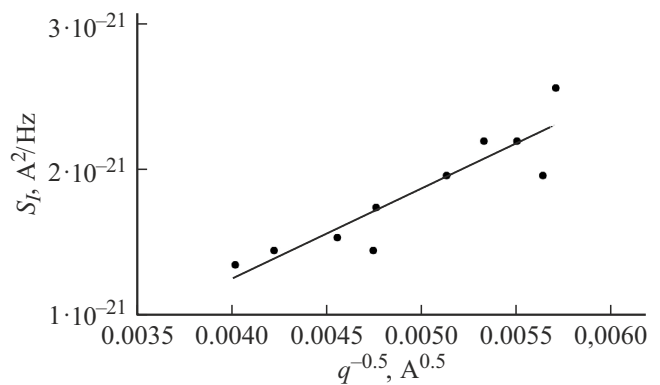
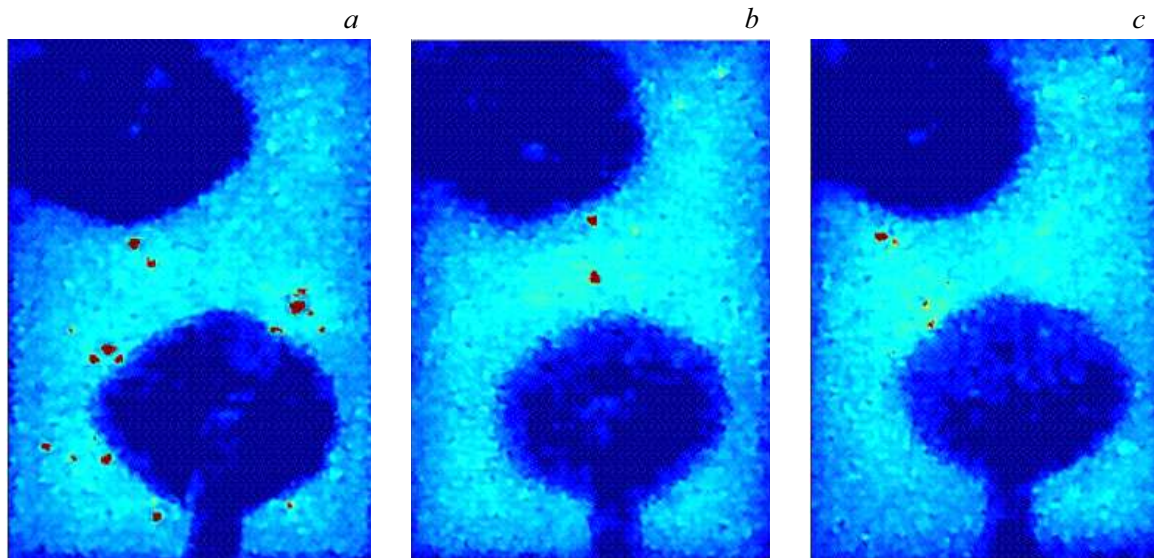


Рис. 3. Поле корреляции между СПМ НЧ шума и параметром  $q$  в координатах  $S_I - 1/\sqrt{q}$ .



**Рис. 4.** Изображения кристаллов трех светодиодов в режиме МП пробоя: (а)  $K = 0.67\%$ ,  $q = 42830 \text{ A}^{-1}$ ; (б)  $K = 0.14\%$ ,  $q = 48293 \text{ A}^{-1}$ ; (с)  $K = 0.10\%$ ,  $q = 62026 \text{ A}^{-1}$ .

показания селективного нановольтметра, настроенного на частоту 1 kHz при ширине полосы пропускания 40 Hz, увеличивали в 2 раза с помощью генератора белого шума Г2-37, включенного параллельно светодиоду. СПМ шума светодиода № 1 с максимальным значением параметра  $q$  составила  $1.3 \cdot 10^{-21} \text{ A}^2/\text{Hz}$ , а СПМ шума светодиода № 2 с минимальным значением параметра  $q$  —  $2.6 \cdot 10^{-21} \text{ A}^2/\text{Hz}$ . Среднее выборочное значение СПМ шума светодиодов составило  $1.9 \cdot 10^{-21} \text{ A}^2/\text{Hz}$ .

На рис. 3 показано поле корреляции между СПМ шума светодиодов и параметром аппроксимирующей функции  $q$ , построенное в координатах  $S_I \sim 1/\sqrt{q}$ . Экспериментальные результаты рис. 3 подчиняются линейной зависимости и подтверждают модельную зависимость (3).

Регистрацию оптического излучения гетероструктур в режиме МП пробоя проводили при напряжении  $-60 \text{ V}$  на установке, описанной в работе [14]. При измерениях параметров светодиодов в режиме МП пробоя рассеиваемая мощность не превышала максимально допустимое значение, и в результате этих кратковременных (порядка одной минуты) измерений деградации характеристик светодиодов, в том числе ватт-амперных характеристик при малых плотностях тока, не происходило.

Принцип работы установки состоит в получении изображения кристалла светодиода ПЗС-матрицей и его последующей попиксельной обработке. Обработка изображения заключалась в выделении активной области кристалла светодиода, расчете средней интенсивности излучения как средней яркости пикселей  $E$ , дисперсии и среднего квадратического отклонения  $\sigma$ . Согласно результатам эксперимента, у всех светодиодов интенсивность свечения в режиме МП пробоя распределена по кристаллу неравномерно: существуют локальные об-

ласти, в которых интенсивность свечения значительно превосходит среднее значение интенсивности свечения кристалла  $\bar{E}$ . Для оценки степени неоднородности свечения структуры в режиме МП пробоя использовался коэффициент  $K = S_{\text{MP}}/S$ , где  $S$  — площадь кристалла,  $S_{\text{MP}}$  — площадь локальных областей структуры, в которых интенсивность свечения превышает значение  $\bar{E} + 3\sigma$ . На рис. 4 эти области обозначены красным цветом. У светодиодов, имеющих более высокую степень неоднородности свечения структуры в режиме МП пробоя  $K$  (большую площадь МП пробоя), параметр  $q$  аппроксимирующей ватт-амперную характеристику функции меньше, что также указывает на более высокую степень дефектности гетероструктуры.

Полученные результаты подтверждают связь параметра  $q$  аппроксимирующей ватт-амперную характеристику функции с концентрацией дефектов гетероструктуры светодиода и возможность использования этого параметра для оценки степени дефектности гетероструктур.

#### Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### Список литературы

- [1] C.D. Santi, M. Meneghini, G. Meneghesso, E. Zanoni. *Microelectronics Reliability*, **64**, 623 (2016). DOI: 10.1016/j.microrel.2016.07.118

- [2] R.I. Made, Yu Gao, G.J. Syaranamual, W.A. Sasangka, L. Zhang, Xuan Sang Nguyen, Y.Y. Tay, J.S. Herrin, C.V. Thompson, C.L. Gan. *Microelectronics Reliability*, **76–77**, 561 (2017). DOI: 10.1016/j.microrel.2017.07.072
- [3] А.А. Богданов. *Светотехника*, **1**, 13–22 (2015).
- [4] В.А. Косарев. *Вестник УлГТУ*, **1**, 30 (2020).
- [5] В.А. Сергеев, О.А. Радаев, И.В. Фролов. *Приборы и техника эксперимента*, **6**, 103 (2023). DOI: 10.31857/S0032816223060071
- [6] L.-W. Xu, K.-Y. Qian. *IEEE Photonics J.*, **9**(4), 8201309 (2017). DOI: 10.1109/JPHOT.2017.2703851
- [7] A.V. Belyakov, A.V. Klyuev, A.V. Yakimov. *Fluctuation and Noise Letters*, **16**(3) 1750030 (2017). DOI: 10.1142/S0219477517500304
- [8] A.V. Klyuev, A.V. Yakimov. *Physica B: Condensed Matter*, **440**, 145 (2014). DOI: 10.1016/j.physb.2014.01.021
- [9] S. Sawyer, S.L. Romyantsev, M.S. Shur, N. Pala, Yu. Bilenko, J.P. Zhang, X. Hu, A. Lunev, J. Deng, R. Gaska. *J. Appl. Phys.*, **100**, 034504 (2006). DOI: 10.1063/1.2204355
- [10] Z.L. Li, S. Tripathy, P.T. Lai, H.W. Choi. *J. Appl. Phys.*, **106**, 094507 (2009). DOI: 10.1063/1.3253754
- [11] В.П. Велешук, А.И. Власенко, М.П. Киселюк, О.В. Ляшенко. *Журнал прикладной спектроскопии*, **80**(1), 121 (2013).
- [12] О.А. Радаев, В.А. Сергеев, И.В. Фролов. *Физические основы приборостроения*, **12**(3), 23–27 (2023). DOI: 10.25210/jfor–2303-UMNPWQ. EDN: UMNPWQ
- [13] В.А. Сергеев, И.В. Фролов, А.А. Широков. *Известия вузов. Электроника*, **20**(6), 598–606 (2015).
- [14] А.А. Казанков, В.А. Сергеев, И.В. Фролов. В сб.: *Вузовская наука в современных условиях* (УлГТУ, Ульяновск, 2023), с. 69.