

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

© И.В. Фролов¹, В.А. Сергеев¹, О.А. Радаев¹, А.А. Казанков^{1,2}

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

² 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 АВС 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 η_{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 η_{extr} — коэффициент оптического вывода излучения, h — постоянная Планка, c — скорость света, λ — 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 $2qI \gg 1$

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

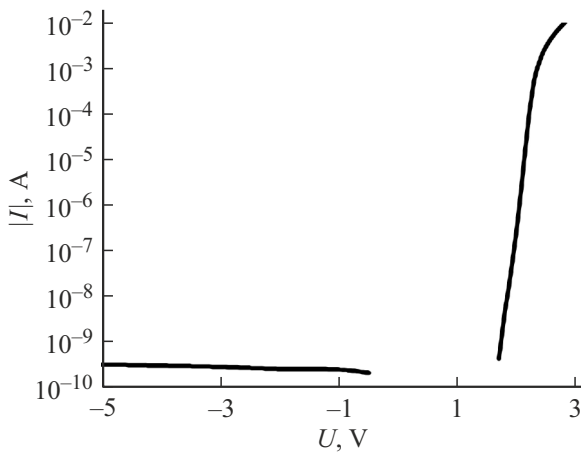


Рис. 1. Вольтамперная характеристика светодиода исследованного типа.

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 μA) 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 $200 \times 130 \mu\text{m}$, 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 $50 \mu\text{A}$ (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 $1 \mu\text{A}$ 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 функцией (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 $20 \mu\text{A}$, а установившиеся за время интегрирования (порядка 10 s)

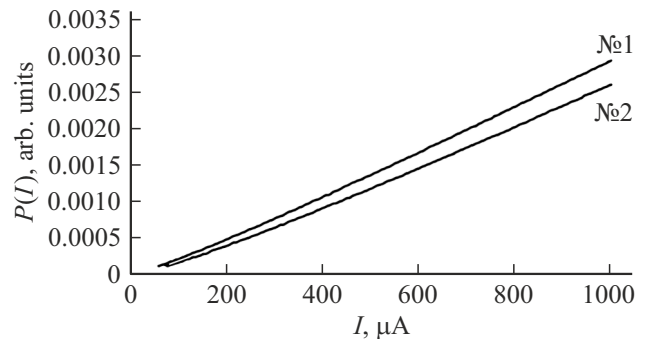


Рис. 2. Ватт-амперные характеристики двух светодиодов: № 1 — $q = 62026 \text{ A}^{-1}$, № 2 — $q = 30746 \text{ A}^{-1}$.

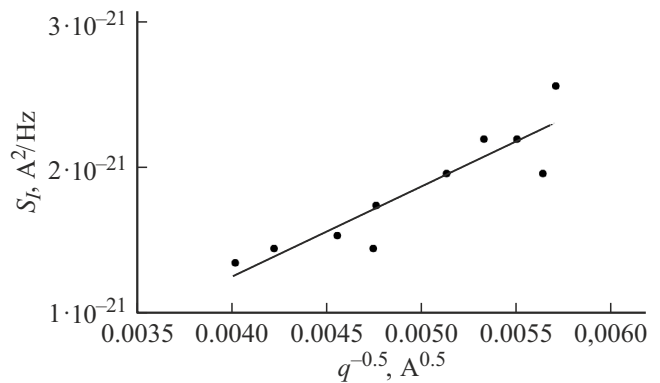


Рис. 3. Поле корреляции между СПМ НЧ шума и параметром q в координатах $S_I - 1/\sqrt{q}$.

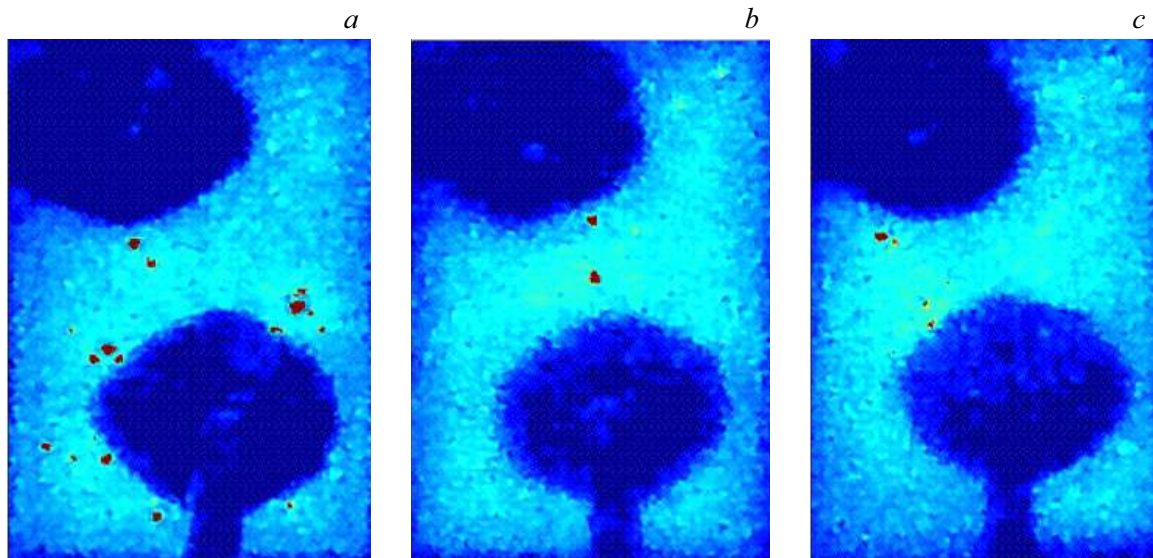


Рис. 4. Изображения кристаллов трех светодиодов в режиме МП пробоя: (а) $K = 0.67\%$, $q = 42830 \text{ A}^{-1}$; (б) $K = 0.14\%$, $q = 48293 \text{ A}^{-1}$; (с) $K = 0.10\%$, $q = 62026 \text{ A}^{-1}$.

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 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 σ . 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_{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.