УДК 621.315.592

Температурные зависимости крутизны ватт-амперной характеристики InGaN/GaN-светодиодных гетероструктур в режиме малых токов

© И.В. Фролов[1], В.А. Сергеев[1], О.А. Радаев[1], А.А. Казанков[1,2]

[1] Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, 432071 Ульяновск, Россия
[2] Ульяновский государственный технический университет, 432071 Ульяновск, Россия

E-mail: ilya-frolov88@mail.ru

Поступила в Редакцию 5 мая 2026 г.
В окончательной редакции 10 июля 2026 г.
Принята к публикации 21 июля 2026 г.

Исследованы температурные зависимости параметров ватт-амперных характеристик светодиодов зеленого свечения и светодиодных матриц белого и ультрафиолетового свечения на основе $In_xGa_{1-x}N$/GaN-светоизлучающих гетероструктур, измеренных в диапазоне токов от 100 нА до 50 мкА, в интервале температур от 25 до 70 °C. Установлено, что при повышении температуры нелинейность ватт-амперных характеристик у всех исследованных образцов растет, а параметр q, определяющий нелинейность аппроксимирующей ватт-амперные характеристики функции, у ультрафиолетовых светодиодных матриц спадает в 2 раза меньше, чем у зеленых светодиодов, и в 1.5 раза меньше, чем у светодиодных матриц белого свечения. При этом крутизна температурной зависимости параметра q в диапазоне температур от 50 до 70 °C заметно меньше, чем в диапазоне от 25 до 50 °C. Полученные результаты могут быть использованы для анализа рекомбинационных процессов в $In_xGa_{1-x}N$/GaN-светоизлучающих гетероструктурах при повышенных температурах окружающей среды.

Ключевые слова: светоизлучающие гетероструктуры, ватт-амперные характеристики, излучательная рекомбинация, безызлучательная рекомбинация, температурная зависимость.

DOI: 10.61011/FTP.2026.09.64165.9730

1. Введение

Разработка неразрушающих методов диагностики дефектов светоизлучающих гетероструктур (СГС), повышение эффективности излучения и надежности светодиодов является актуальной задачей [1,2]. В работах [3–5] показано, что параметры ватт-амперных характеристик (ВтАХ) светодиодов, измеренных в диапазоне малых токов, чувствительны к дефектам СГС. Это объясняется тем, что при малых токах конкурирующими рекомбинационными процессами в СГС являются процессы излучательной и безызлучательной рекомбинации Шокли–Рида–Холла, связанной с дефектами СГС, что подтверждается результатами исследований флуктуаций тока и оптического излучения светодиодов на основе СГС различных типов [6,7]. В работах [8–10] показано, что скорости различных процессов рекомбинации носителей заряда существенно и по-разному зависят от температуры активной области. Эти зависимости позволяют описать электрооптические характеристики светодиодов с различной мольной долей индия (x) в квантовой яме СГС при различных температурах для диагностического контроля качества.

Цель работы заключалась в исследовании и сравнительном анализе температурной зависимости ВтАХ светодиодов и светодиодных матриц на основе $In_xGa_{1-x}N$/GaN СГС с различным содержанием x индия In в диапазоне малых токов.

В работе [11] на основе теоретического анализа ABC-модели рекомбинации носителей заряда в СГС показано, что при малых токах, при которых действием оже-рекомбинации можно пренебречь, ватт-амперная характеристика светодиода на основе $In_xGa_{1-x}N$/GaN-гетероструктуры аппроксимируется функцией

$$P(I) = \frac{m}{2}\left(\sqrt{1 + 2q(I - I_{\text{th}})} - 1\right)^2, \qquad (1)$$

где I_{th} — пороговый ток, при котором возникает излучение структуры; m и q — коэффициенты, связанные с рекомбинационными параметрами светоизлучающей структуры. В этой функции параметр q прямо пропорционален коэффициенту B излучательной рекомбинации и обратно пропорционален квадрату коэффициента A безызлучательной рекомбинации в светодиодной гетероструктуре:

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

где η_{inj} — коэффициент инжекции носителей заряда в активную область; e — элементарный заряд; V — объем активной области гетероструктуры. Значение параметра q определяется крутизной (нелинейностью) ВтАХ: чем больше нелинейность, тем меньше q.

В работе [12] экспериментально подтверждено, что параметр q аппроксимирующей функции (1) связан с

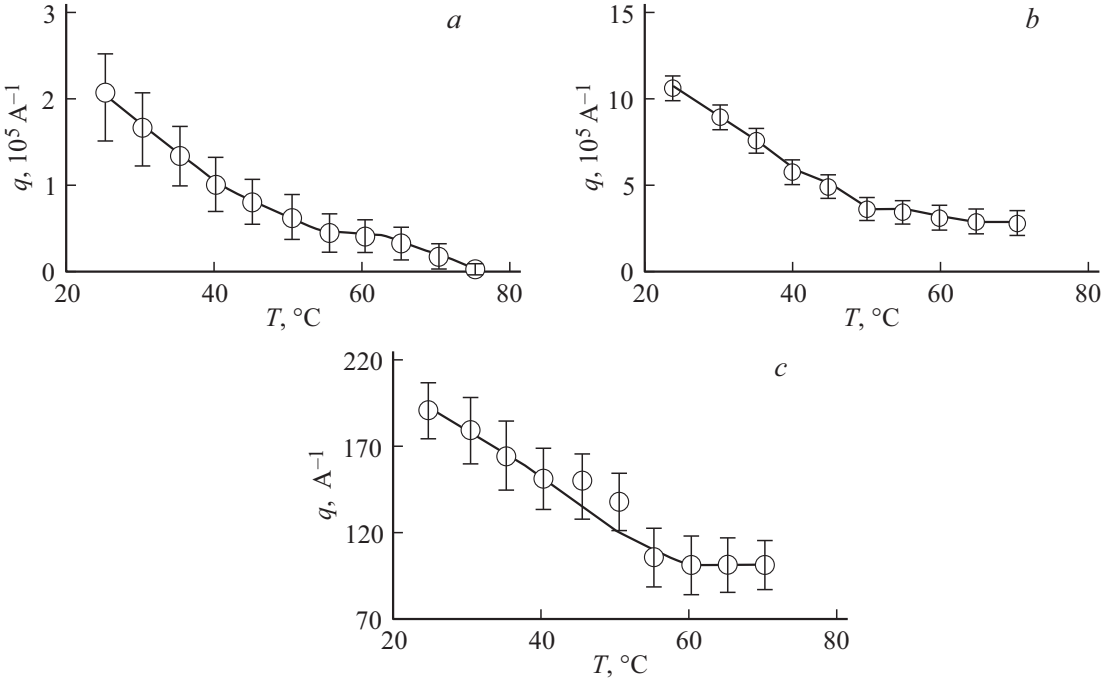

Рис. 1. Зависимость параметра q аппроксимирующей функции от температуры: a — для зеленых светодиодов; b — для белых светодиодных матриц; c — для УФ светодиодных матриц.

концентрацией дефектов обратной корневой зависимостью и по его значению можно выявлять в пределах выборки светодиодов одного типа потенциально ненадежные светодиоды с повышенной концентрацией дефектов СГС.

Были исследованы температурные зависимости параметра q ВтАХ светодиодных матриц белого свечения фирмы Osram серии Duris S8, состоящих из десяти последовательно соединенных кристаллов и покрытых слоем люминофора (с концентрацией In $x = 0.18$), УФ светодиодных матриц, состоящих из девяти последовательно-параллельно соединенных кристаллов в корпусе COB производства Chanzon LED ($x = 0.02$), а также зеленых светодиодов XREGRN-L1-0000-00P01 производства Cree ($x = 0.22$). Измерения ВтАХ выполнялись на аппаратно-программном комплексе [13], который регистрировал интенсивность излучения кристаллов цифровой камерой FL-20BW при постоянном токе, устанавливаемом в диапазоне от 100 нА до 10 мкА. Температура матриц устанавливалась элементом Пельтье в диапазоне 25–70 °C и измерялась термопарой.

Установлено, что у всех исследованных светодиодов и светодиодных матриц при повышении температуры параметр q аппроксимирующей функции уменьшается, что свидетельствует о росте нелинейности ВтАХ. У зеленых светодиодов параметр q при температуре 25 °C принимает значение $0.2 \cdot 10^6$ A^{-1}. При повышении температуры до 55 °C значение q практически линейно уменьшается до $0.6 \cdot 10^4$ A^{-1}. При дальнейшем повышении температуры параметр q изменяется слабо и при 70 °C составляет $4.6 \cdot 10^3$ A^{-1} (рис. 1, a).

У матриц белого свечения параметр q при температуре 25 °C равен $1.1 \cdot 10^6$ A^{-1} и в диапазоне температур до 50 °C значение q линейно уменьшается до $0.4 \cdot 10^6$ A^{-1}. При дальнейшем повышении температуры параметр q изменяется слабо и при 70 °C составляет $0.3 \cdot 10^6$ A^{-1} (рис. 1, b).

У УФ светодиодных матриц параметр q в диапазоне температур от 25 до 50 °C уменьшается от значения 192 до 140 A^{-1}, а при повышении температуры до 70 °C спадает до 100 A^{-1} (рис. 1, c).

У всех исследованных светодиодов и светодиодных матриц в окрестности температуры 50–55 °C происходит уменьшение крутизны температурной зависимости $q(T)$. Значения относительного коэффициента температурной зависимости $q(T)$ для СГС с различным содержанием x индия In при температурах 25–50 и 50–70 °C приведены в таблице, а графики зависимостей показаны на рис. 2.

Из таблицы видно, что у УФ светодиодных матриц зависимость $q(T)$ существенно слабее, что определяется низкой долей индия (x) в квантовой яме.

Согласно результатам исследований, приведенным в работах [8,14,15], при увеличении температуры скорость безызлучательной рекомбинации возрастает по закону вида $A(T) \sim e^{-1/T}$, а скорость излучательной рекомбинации уменьшается по закону $B(T) \sim 1/T^{\delta}$, где показатель степени δ зависит от зонной структуры полупроводника и плотности носителей заряда и принимает значения, близкие к 1.5. Результаты аппроксимации зависимости параметра q от температуры T с учетом температурных зависимостей коэффициентов безызлучательной и

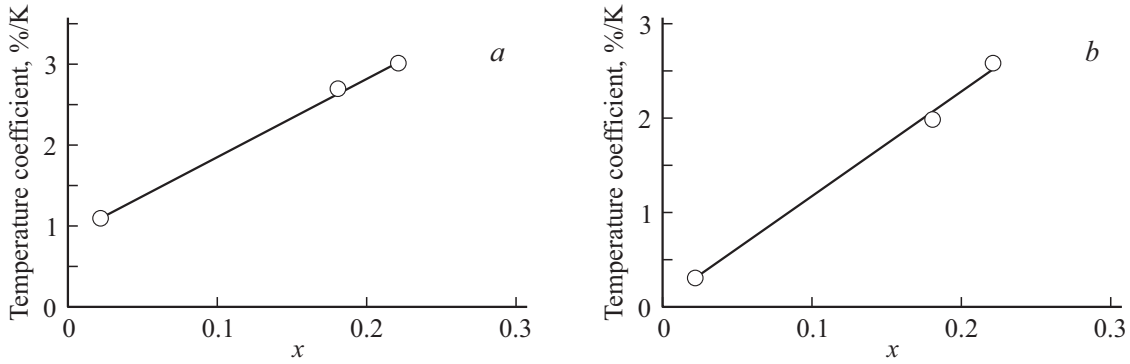

Рис. 2. Температурный коэффициент зависимости $q(T)$ для СГС с различным содержанием In (x) для диапазонов температур 25–50 °C (a) и 50–70 °C (b).

Относительный коэффициент температурной зависимости $q(T)$

	Относительный коэффициент температурной зависимости, %/K	
Содержание In в СГС	$T = 25–50$ °C	$T = 50–70$ °C
$x = 0.22$	3.0	2.6
$x = 0.18$	2.7	2.0
$x = 0.02$	1.1	0.3

излучательной рекомбинации A и B показывают, что при увеличении температуры от 25 до 70 °C коэффициент инжекции носителей заряда в активную область η_{inj} уменьшается в ~ 4 раза для СГС с $x = 0.22$ (зеленые светодиоды), в ~ 3 раза для СГС с $x = 0.18$ (белые светодиодные матрицы) и ~ 1.5 раза для СГС с $x = 0.02$ (УФ светодиодные матрицы).

Таким образом, в работе показано, что при увеличении температуры степень нелинейности ВтАХ светодиодов и светодиодных матриц на основе InGaN/GaN-гетероструктур в режиме малых токов возрастает. При температуре активной области $> 50–55$ °C температурная зависимость крутизны ВтАХ уменьшается, что, на наш взгляд, определяется уменьшением коэффициента инжекции носителей заряда в активную область. Полученные результаты могут быть использованы для оценки значений электрооптических характеристик светодиодов и светодиодных матриц на основе $In_xGa_{1-x}N$/GaN СГС с различным содержанием индия (x) в квантовой яме при эксплуатации в условиях повышенной температуры, а также для оценки изменений скорости излучательной и безызлучательной рекомбинации носителей заряда в СГС при изменении температуры активной области светодиода.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (FFWZ-2025-0001).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] N. Mustapha, M. Hjiri. J. Mater. Sci., **51**, 12227 (2026). DOI: 10.1007/s10853-026-12594-2
[2] N. Roccato, F. Piva, M. Buffolo, C. De Santi, N. Trivellin, C. Haller, J.-F. Carlin, N. Grandjean, G. Meneghesso, E. Zanoni. J. Phys. D: Appl. Phys., **57** (47), 475102 (2024). DOI: 10.1088/1361-6463/ad7039
[3] А.В. Градобоев, К.Н. Орлова, Ф.Ф. Жамалдинов. Приборы и техника эксперимента, **1**, 80 (2023). DOI: 10.31857/S0032816222060131
[4] N. Renso, C. De Santi, A. Caria, F. Dalla Torre, L. Zecchin, G. Meneghesso, E. Zanoni, M. Meneghini. J. Appl. Phys., **127**, 185701 (2020). DOI: 10.1063/1.5135633
[5] И. Фролов, В. Сергеев, О. Радаев. Полупроводниковая светотехника, **1**, 12 (2023).
[6] A.V. Belyakov, A.V. Klyuev, A.V. Yakimov. Fluct. Noise Lett., **16** (3), 1750030 (2017). DOI: 10.1142/S0219477517500304
[7] A.V. Klyuev, A.V. Yakimov. Phys. B: Condens. Matter, **440**, 145 (2014). DOI: 10.1016/j.physb.2014.01.021
[8] H.-Y. Ryu, G.-H. Ryu, C. Onwukaeme, B. Ma. Opt. Express, **28** (19), 27459 (2020). DOI: 10.1364/OE.402831
[9] P. Tian, J.J.D. McKendry, J. Herrnsdorf, S. Watson, R. Ferreira, I.M. Watson, E. Gu, A.E. Kelly, M.D. Dawson. Appl. Phys. Lett., **105** (17), 171107 (2014). DOI: 10.1063/1.4900865
[10] A.B.M.H. Islam, T.K. Kim, Y.-J. Cha, D.-S. Shin, J.-I. Shim, J.S. Kwak. ECS J. Solid State Sci. Technol., **12** (12), 125002 (2023). DOI: 10.1149/2162-8777/ad105d
[11] В.А. Сергеев, И.В. Фролов, О.А. Радаев. Опт. и спектр., **134** (2), 157 (2026). DOI: 10.61011/OS.2026.02.62691.8503-25
[12] И.В. Фролов. РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, **16** (4), 441 (2024). DOI: 10.17725/rensit.2024.16.441
[13] I.V. Frolov, V.A. Sergeev, O.A. Radaev. IEEE Trans. Instrum. Meas., **72**, 5000806 (2023). DOI: 10.1109/TIM.2022.3206812

[14] D.-P. Han, G.W. Lee, S. Min, D.-S. Shin, J.-I. Shim, M. Iwaya, T. Takeuchi, S. Kamiyama, I. Akasaki. Sci. Rep., **10**, 17433 (2020). DOI: 10.1038/s41598-020-74585-w
[15] L. Zhao, D. Yan, Z. Zhang, B. Hua, G. Yang, Y. Cao, E.X. Zhang, X. Gu, D.M. Fleetwood, IEEE Electron Dev. Lett., **39** (4), 528 (2018). DOI: 10.1109/LED.2018.2805192

Редактор А.Н. Смирнов

Temperature dependencies of the slope of the $P-I$ characteristic of InGaN/GaN LED heterostructures in the low-current mode

I.V. Frolov[1], *V.A. Sergeev*[1], *O.A. Radaev*[1], *A.A. Kazankov*[1,2]

[1] Ulyanovsk Branch of the Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, 432071 Ulyanovsk, Russia
[2] Ulyanovsk State Technical University, 432071 Ulyanovsk, Russia

Abstract The temperature dependences of the $P-I$ characteristic of green LEDs and white and ultraviolet LED arrays based on $In_xGa_{1-x}N$/GaN light-emitting heterostructures were investigated. The measurements were performed in the current range from 100 nA to 50 μA and in the temperature range from 25 to 70 °C. It was found that with increasing temperature, the $P-I$ characteristics nonlinearity increases for all the investigated samples, while the q parameter, which determines the nonlinearity of the $P-I$ characteristics approximating function, decreases for ultraviolet LED arrays by a factor of 2 less than that of green LEDs and by a factor of 1.5 less than that of white LED arrays. Moreover, the steepness of the temperature dependence of the q parameter in the temperature range from 50 to 70 °C is noticeably less than in the range from 25 to 50 °C. The obtained results can be used to analyze recombination processes in $In_xGa_{1-x}N$/GaN light-emitting heterostructures at elevated ambient temperatures.