

Исследование ватт-амперных характеристик светодиодов на основе InGaN/GaN-гетероструктур на разных участках спектра излучения

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

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 28.08.2025 г.

В окончательной редакции 11.12.2025 г.

Принята к публикации 13.12.2025 г.

Исследованы ватт-амперные характеристики ультрафиолетовых, голубых и зеленых светодиодов на основе InGaN/GaN-гетероструктур, измеренные на разных участках спектра излучения со спектральным разрешением порядка 1.5 nm. По результатам измерения и аппроксимации ватт-амперных характеристик различными функциями определялись значения порогового тока, значения тока, при котором достигается максимум внутренней квантовой эффективности, и параметра, определяющего степень нелинейности ватт-амперной характеристики в диапазоне малых токов. Установлено, что у ультрафиолетовых светодиодов все три параметра слабо зависят от длины волны спектра излучения. У зеленых и синих светодиодов указанные параметры различаются на коротковолновом и длинноволновом участках спектра, причем для зеленых светодиодов это различие больше, чем для синих. Различия параметров светодиодов разного цвета свечения на основе InGaN/GaN-гетероструктур с квантовыми ямами объясняются различием концентраций и неоднородным распределением индия в квантовых ямах гетероструктуры.

Ключевые слова: светодиодная гетероструктура, спектры излучения, ватт-амперные характеристики, пороговый ток, ток максимума квантовой эффективности.

DOI: 10.61011/OS.2026.02.62691.8503-25

Введение

Ватт-амперная характеристика светодиода — зависимость мощности излучения от силы тока — является важнейшей функциональной характеристикой светодиода. Для аппроксимации ватт-амперной характеристики многими авторами используется функция вида $P(I) = P_0(I/I_0)^a$ [1–3]. При этом, как показано в работе [3], показатель степени a у идеального светодиода равен 1, а у реального светодиода значение показателя степени зависит от тока: при малых токах $a > 1$, при больших токах $a < 1$ [3]. Сублинейная зависимость при больших плотностях тока определяется заполнением квантовых ям носителями заряда [4]. Суперлинейная зависимость ($a > 1$) мощности излучения от силы тока при низких уровнях инжекции обусловлена конкуренцией между процессами излучательной и безызлучательной рекомбинации носителей заряда. Таким образом, наиболее чувствительным к дефектам светоизлучающей гетероструктуры является участок ватт-амперной характеристики светодиода в диапазоне малых токов, что также подтверждается результатами исследований электрооптических и вольт-амперных характеристик, параметров низкочастотного шума и др. [5–10].

В работах [11–13] показано, что по ватт-амперным характеристикам могут быть определены связанные с дефектами гетероструктуры светодиода параметры, такие как пороговый ток, внутренняя квантовая эффектив-

ность (ВКЭ) [11] и степень нелинейности ватт-амперной характеристики в диапазоне малых токов. При этом указанная аппроксимирующая функция не отражает всех особенностей ватт-амперной характеристики светодиодов в диапазоне малых токов, поскольку параметр a является функцией тока.

Приводимые в литературе результаты экспериментального исследования ватт-амперных характеристик светодиодов основываются на измерении мощности излучения в полном диапазоне спектра излучения. Измерения ватт-амперных характеристик не в полном спектре излучения, а на разных участках спектра излучения позволяют получить дополнительную информацию о свойствах светоизлучающей гетероструктуры, в том числе об однородности ее состава, которая может использоваться производителями светодиодов для оценки их качества, определении ресурса наработки и надежности в целом, а также разработчиками широкозонных нитридных светодиодных гетероструктур с целью совершенствования технологии эпитаксии.

Цель настоящей работы заключалась в исследовании параметров ватт-амперных характеристик, измеренных на разных участках спектра излучения, нескольких типов светодиодов на основе гетероструктур InGaN/GaN с множественными квантовыми ямами и в выявлении связи этих параметров с концентрацией и неоднородностью распределения индия (In) в квантовых ямах.

Методика эксперимента

Измерения проводились на аппаратно-программном комплексе для измерения ватт-амперных характеристик и граничных частот электролюминесценции спектральных составляющих излучения светодиодов [14]. Питание светодиода постоянным током осуществлялось от лабораторного источника питания АКПП-1113. Сила тока контролировалась прецизионным мультиметром Tektronix DMM4040. На каждую декаду задавалось 10 значений тока. Спектрометром Ocean Optics USB2000+VIS+NIR, входящим в состав аппаратно-программного комплекса, регистрировались спектры излучения светодиодов $E(\lambda_i)$ при токах I в диапазоне от 30 нА до 100 мА. Время экспозиции оптического сигнала устанавливалось в диапазоне 1 мс–5 с. Спектральное разрешение спектрометра определяется величиной полной ширины на уровне половинной мощности — $FWHM$. В конфигурации спектрометра OceanOptics USB2000+, использованного в составе аппаратно-программного комплекса, $FWHM = 1.5$ нм. Спектры излучения сохранялись в текстовые файлы. Участки спектра для расчета ватт-амперных характеристик выделялись программно. Обработка спектров излучения проводилась в среде MathCAD.

Для каждого значения длины волны излучения λ_i строилась зависимость интенсивности излучения от тока $E_i(I)$. Интенсивность излучения E , регистрируемая спектрометром, прямо пропорциональна мощности излучения светодиода P . Следовательно, можно перейти к ватт-амперным характеристикам $P_i(I)$, измеренным на разных участках спектра излучения светодиода со спектральным разрешением 1.5 нм:

$$P_i(I) = kE_i(I). \quad (1)$$

Для аппроксимации ватт-амперной характеристики светодиода в диапазоне малых токов, при которых действием оже-рекомбинации можно пренебречь, в работе [12] на основе АВС-модели рекомбинации носителей заряда в гетероструктуре предложена функция

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

где I_{th} — пороговый ток, при котором возникает излучение структуры, m и q — коэффициенты, связанные с рекомбинационными параметрами светоизлучающей структуры.

В работе [15] показано, что коэффициент q , определяющий степень нелинейности ватт-амперной характеристики, прямо пропорционален коэффициенту излучательной рекомбинации B и обратно пропорционален квадрату коэффициента A безызлучательной рекомбинации:

$$q = \frac{\eta_{inj}}{eV} \frac{2B}{A^2}, \quad (3)$$

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

В работе [16] показано, что коэффициент безызлучательной рекомбинации A пропорционален концентрации центров захвата носителей заряда (дефектов): $A \sim N_T$. В работе [13] установлено, что параметр q и концентрация дефектов N_T связаны зависимостью вида

$$N_T \sim q^{-0.5}. \quad (4)$$

При аппроксимации результатов измерений ватт-амперных характеристик светодиода, измеренных со спектральным разрешением, функцией (2) получаем функцию

$$P_i(I) = \frac{m_i}{2} \left(\sqrt{1 + 2q_i(I - I_{th_i})} - 1 \right)^2, \quad (5)$$

параметры m_i , q_i и I_{th_i} которой определяются в узком спектральном диапазоне шириной 1.5 нм с центральной длиной волны λ_i .

При малых токах параметр q аппроксимирующей функции связан с внутренней квантовой эффективностью (параметром, который определяет эффективность преобразования электрического тока в оптическое излучение и характеризует качество эпитаксиальных слоев) выражением [11]

$$\eta_{IQE}(I) = \frac{\sqrt{1 + 2qI} - 1}{\sqrt{1 + 2qI} + 1}. \quad (6)$$

Измерив мощность излучения светодиода $P(I_1)$ и $P(I_2)$ при двух значениях тока I_1 и I_2 из диапазона малых токов и записав выражение (5) для этих значений, получим систему уравнений для нахождения значения параметра q . Подставляя полученное выражение для параметра q в (6), получим формулу для расчета ВКЭ при произвольном значении тока:

$$\eta_{IQE}(I) = \frac{I_1 \sqrt{P(I_2)} - I_2 \sqrt{P(I_1)}}{P(I_1) \sqrt{P(I_2)} - P(I_2) \sqrt{P(I_1)}} \frac{P(I)}{I}. \quad (7)$$

При расчете ВКЭ ток I_2 задается равным $I_2 = 0.2I_{max}$, где I_{max} — ток, при котором функция $U(I)/I$ достигает максимального значения, а ток I_1 выбирается из условия $I_1 \approx 0.5I_2 = 0.1I_{max}$. Для современных светодиодов на основе InGaN/GaN-гетероструктур максимум ВКЭ достигается при плотностях тока 1–10 А/см².

Подставляя в выражение (7) ватт-амперную характеристику $P_i(I)$, измеренную на разных участках спектра излучения, получаем выражение для ВКЭ в i -м спектральном диапазоне:

$$\eta_{IQE_i}(I) = \frac{I_1 \sqrt{P_i(I_2)} - I_2 \sqrt{P_i(I_1)}}{P_i(I_1) \sqrt{P_i(I_2)} - P_i(I_2) \sqrt{P_i(I_1)}} \frac{P_i(I)}{I}. \quad (8)$$

Для каждой длины волны излучения λ_i определялся ток I_{max_i} , при котором спектральная квантовая эффективность η_{IQE_i} , измеренная со спектральным разрешением, достигает максимального значения.

В работе исследованы зависимости порогового тока I_{th_i} , параметра аппроксимирующей функции q_i и тока I_{max_i} , при котором достигается максимум ВКЭ, от длины волны излучения λ_i , в окрестностях которой измеряется ватт-амперная характеристика светодиода.

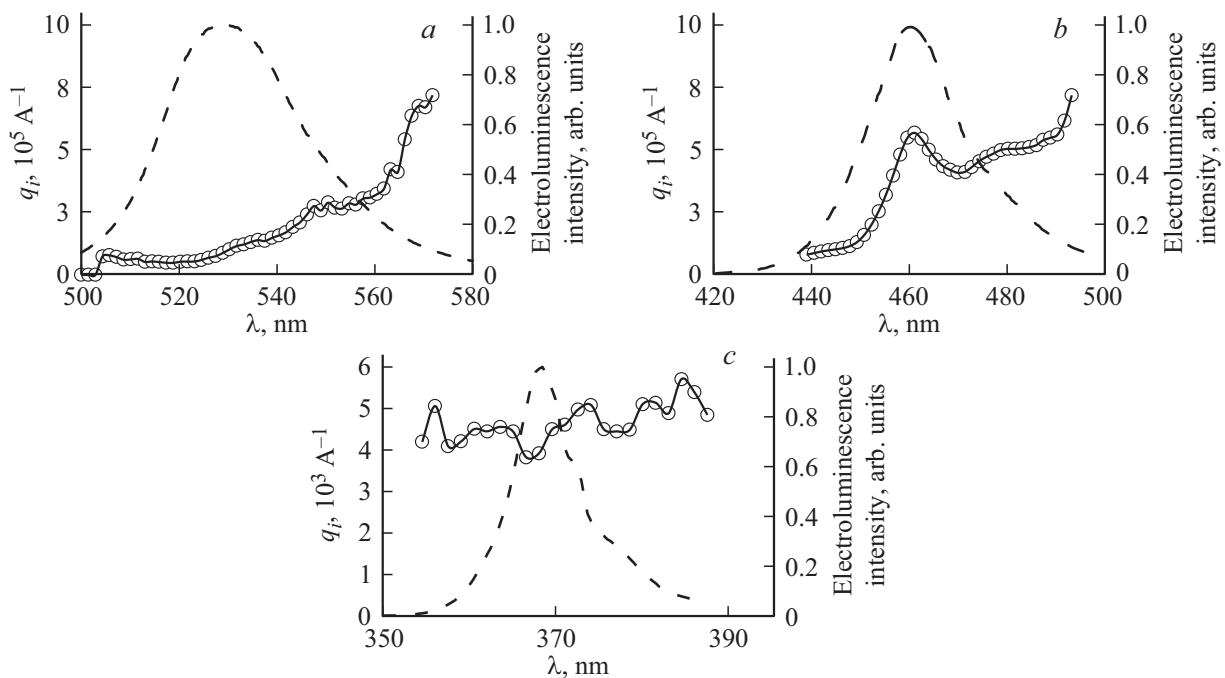


Рис. 1. Зависимость параметра q_i аппроксимирующей функции (5) от длины волны спектра излучения зеленых (a), синих (b) и ультрафиолетовых (c) светодиодов. Штриховыми линиями обозначены спектры излучения светодиодов.

Результаты эксперимента и обсуждение

Исследованы светодиоды трех типов: ультрафиолетовые светодиоды типа VLMU1610-365-135 производства Vishay Intertechnology Inc., синие светодиоды типа ARL-5213PBC производства Arlight и зеленые светодиоды ARL-5213PGC производства Arlight. Все светодиоды имеют гетероструктуру InGaN/GaN.

На рис. 1 показаны зависимости параметра q от длины волны спектра излучения. Из рисунка видно, что для синих светодиодов параметр q в 5–10 раз больше, чем для зеленых, и в 100 раз больше, чем для ультрафиолетовых. Это означает, что у синих светодиодов ватт-амперная характеристика более линейная, чем у зеленых и ультрафиолетовых.

Установлено, что для зеленых светодиодов параметр q_i аппроксимирующей функции (5) в коротковолновом диапазоне спектра излучения в 10 раз меньше, чем в длинноволновом диапазоне спектра (рис. 1, a), для синих светодиодов — в 5 раз (рис. 1, b), а для ультрафиолетовых светодиодов значение параметра q_i слабо зависит от длины волны излучения (рис. 1, c).

Анализ зависимостей тока, при которых достигается максимум ватт-амперных характеристик, измеренных на разных участках спектра излучения, от длины волны излучения показал, что у ультрафиолетовых светодиодов ток I_{\max} одинаков на всех длинах волн спектра излучения и составляет 20 мА (рис. 2, a). У синих светодиодов ток I_{\max} на коротковолновом крыле спектра больше, чем на длинноволновом, при этом на длинноволновом крыле ток I_{\max} принимает постоянное значение, равное 100 мА (рис. 2, b). У зеленых светодиодов на коротковолновом

крыле ток I_{\max} достигает 20 мА, на коротковолновом — спадает до 10 мА (рис. 2, c).

Зависимость $I_{\max}(\lambda)$ наиболее выражена у зеленых светодиодов: в диапазоне длин волн от 500 до 550 нм I_{\max_i} изменяется в 1000 раз. У синих светодиодов зависимость $I_{\max_i}(\lambda)$ слабее: в диапазоне длин волн от 440 до 480 нм I_{\max_i} изменяется в 50 раз. У ультрафиолетовых светодиодов зависимость $I_{\max_i}(\lambda)$ не проявляется.

Результаты измерений пороговых токов отдельных спектральных составляющих излучения исследованных светодиодов приведены на рис. 3. Для всех исследованных светодиодов пороговый ток длинноволновых составляющих спектра больше, чем пороговый ток коротковолновых составляющих. Относительная разность значений порогового тока спектральных составляющих коротковолнового и длинноволнового крыльев спектра излучения составляет для ультрафиолетовых светодиодов порядка 4%, для голубых порядка 7%, для зеленых порядка 30%.

Для объяснения полученных результатов рассмотрим модель формирования спектра излучения InGaN/GaN-гетероструктурой с неоднородным распределением индия, представленную в работе [17]. Согласно этой модели, светодиод может быть представлен совокупностью параллельно включенных микродиодов, имеющих одинаковые параметры широкозонных n -GaN- и p -GaN-эмиттеров, но отличающихся друг от друга концентрацией индия x в квантовых ямах (рис. 4). В результате коротковолновое крыло спектра излучения светодиода формируют локальные области с пониженной концентрацией индия, а длинноволновое — с повышенной.

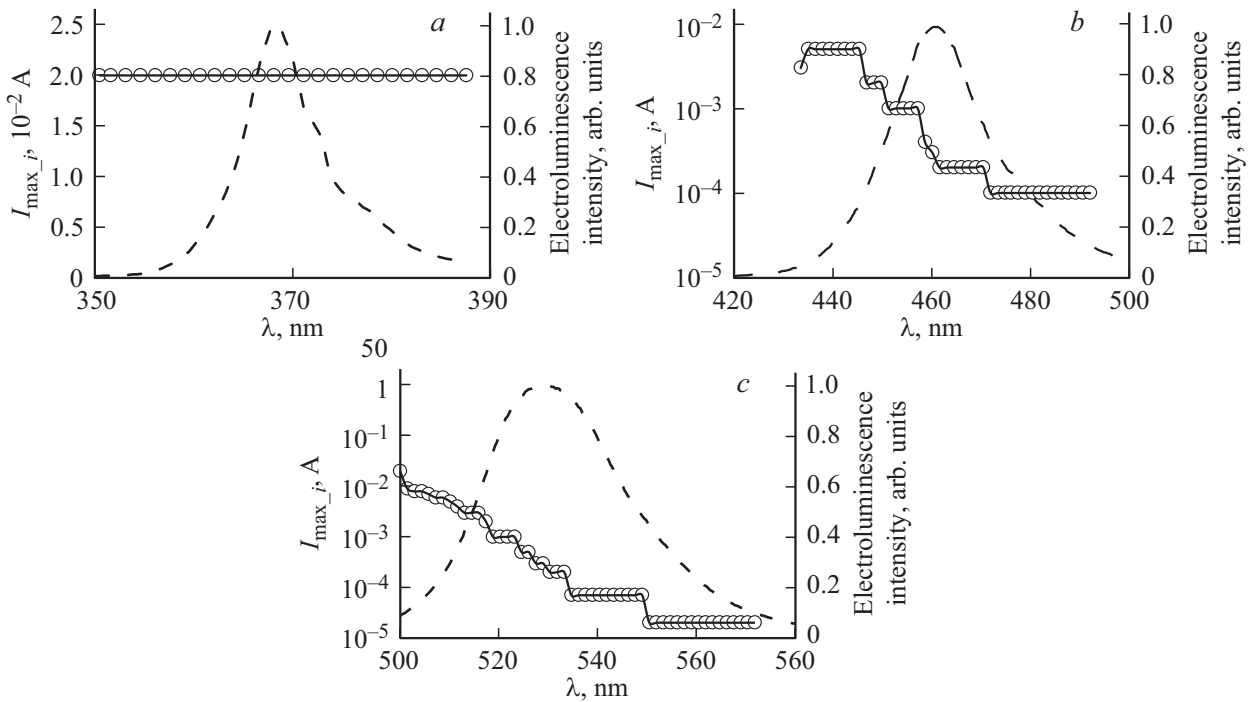


Рис. 2. Зависимость тока, при котором достигается максимум ВКЭ, измеренной на разных участках спектра, от длины волны излучения ультрафиолетовых (а), синих (b) и зеленых (c) светодиодов. Штриховыми линиями обозначены спектры излучения светодиодов.

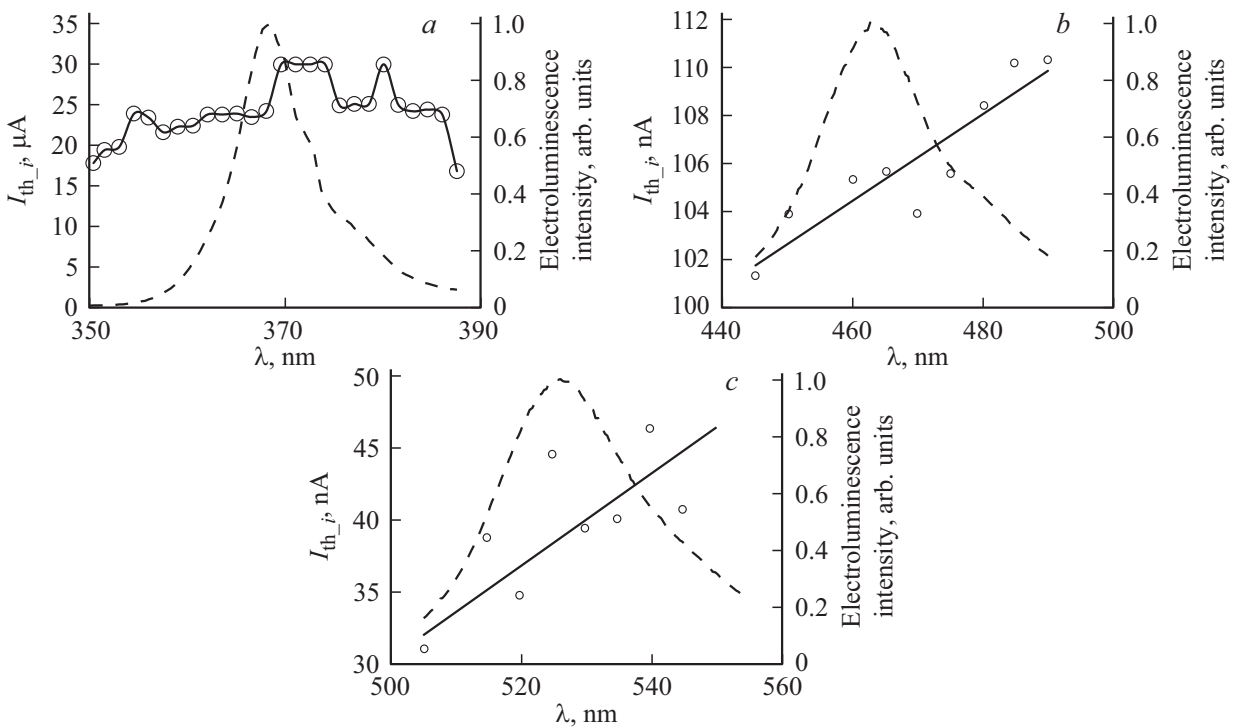


Рис. 3. Зависимость порогового тока от длины волны спектра излучения ультрафиолетовых (а), синих (b) и зеленых (c) светодиодов. Штриховыми линиями обозначены спектры излучения светодиодов.

Последовательно с этой совокупностью микродиодов включены общие сопротивления p - и n -контактов R_p и R_n соответственно. Площади микродиодов (секторов,

площадок) $S(x)$ с различным содержанием индия x в квантовых ямах в первом приближении могут быть описаны гауссовским распределением относительно средних

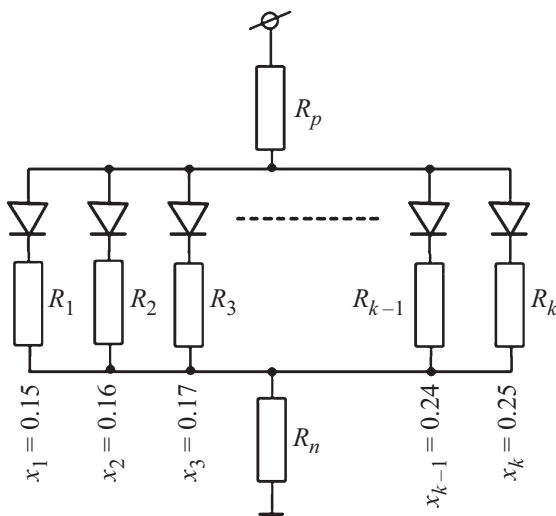


Рис. 4. Электрическая модель светодиода с неоднородным распределением индия в квантовой яме InGaN/GaN-гетероструктуры синего светодиода [17].

значений $x = 0.28$ для зеленых светодиодов, $x = 0.18$ для синих и $x = 0.02$ для ультрафиолетовых.

Каждый микродиод имеет пороговое напряжение U_{th_i} ($i = 1, \dots, k$), которое прямо пропорционально ширине запрещенной зоны и обратно пропорционально концентрации индия x в квантовых ямах. Поскольку разность между U_{th_1} и U_{th_k} составляет несколько процентов, разность в пороговых значениях тока I_{th_1} и I_{th_k} обусловлена разностью в последовательных (дифференциальных) сопротивлениях микродиодов R_i ($R_1 < R_k$), что согласуется с результатами моделирования вольт-амперных характеристик синих светодиодов с различной концентрацией индия, представленными в [17].

Увеличение концентрации x индия в квантовой яме приводит не только к образованию кластеров, но и к увеличению степени неоднородности его распределения [18]. Результаты исследований, представленные в работе [19], показывают, что при концентрациях индия, превышающих $x = 0.1$, наблюдается существенное увеличение неоднородности его распределения.

Полученные экспериментальные результаты могут быть интерпретированы следующим образом: при прохождении тока через гетероструктуру излучательная рекомбинация сначала возникает в областях с меньшей концентрацией индия, формирующих коротковолновое крыло спектра излучения. По мере увеличения тока излучение возникает в областях с большей концентрацией индия. В локальных областях с малой концентрацией индия максимум внутренней квантовой эффективности достигается при больших токах, и ватт-амперная характеристика имеет большую степень нелинейности, чем в локальных областях с высокой концентрацией индия. Чем больше неоднородность концентрации индия в квантовой яме, тем больше относительная разность в значениях I_{th_i} , I_{max_i} и q_i на длинноволновых и коротковолновых составляющих спектра.

Заключение

В работе представлены результаты исследований параметров ватт-амперных характеристик ультрафиолетовых, синих и зеленых светодиодов на основе InGaN/GaN-гетероструктур с множественными квантовыми ямами, измеренных на разных участках спектра излучения со спектральным разрешением 1.5 nm. Установлено, что у светодиодов всех исследованных типов пороговый ток длинноволновых составляющих спектра больше, чем пороговый ток коротковолновых составляющих, причем для зеленых светодиодов это различие более существенно, чем для ультрафиолетовых и голубых светодиодов. Параметр аппроксимирующей функции q , определяющий степень нелинейности ватт-амперной характеристики в диапазоне малых токов, у зеленых светодиодов в коротковолновом диапазоне спектра излучения в 10 раз меньше, чем в длинноволновом диапазоне спектра, для синих светодиодов — в 5 раз, а для ультрафиолетовых светодиодов он слабо зависит от длины волны излучения. На основании модели, представляющей светодиод с неоднородным распределением концентрации индия в квантовых ямах в виде множества параллельно включенных микродиодов с различной шириной запрещенной зоны, показано, что различия в значениях параметров ватт-амперных характеристик, измеренных со спектральным разрешением, на коротковолновом и длинноволновом участках спектра излучения в гетероструктурах InGaN/GaN определяются концентрацией и неоднородным распределением индия в квантовой яме. Относительная разность значений параметров ватт-амперных характеристик, измеренных со спектральным разрешением, может быть использована для косвенной оценки степени неоднородности распределения концентрации индия в InGaN/GaN-квантовой яме.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ 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] А.Р. Расул, К.Н. Орлова. Вестник Национального исследовательского ядерного университета „МИФИ“, **13** (1), 52 (2024). DOI: 10.26583/vestnik.2024.308
- [2] M. Meneghini, N. Trivellin, G. Meneghesso, E. Zanoni, U. Zehnder, B. Hahn. J. Appl. Phys., **106**, 114508 (2009). DOI: 10.1063/1.3266014
- [3] D.S. Meyaard, G.-B. Lin, J. Cho, E.F. Schubert. *Nitride Semiconductor Light-Emitting Diodes (LEDs): Materials, Technologies and Applications* (Woodhead Publishing, 2014), p. 279–300. DOI: 10.1533/9780857099303.2.279

- [4] М.А. Минтаиров, В.В. Евстропов, Н.А. Калужный, Д.А. Малевский, С.А. Минтаиров, М.З. Шварц. *Опт. и спектр.*, **132** (12), 1214 (2024). DOI: 10.61011/OS.2024.12.59794.6601-24
- [5] А.В. Градобоев, К.Н. Орлова, Ф.Ф. Жамалдинов. *Приборы и техника эксперимента*, **1**, 80 (2023). DOI: 10.56304/S2304487X21060080
- [6] 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
- [7] C. Li, Z. Ji, J. Li, M. Xu, H. Xiao, X. Xu. *Sci. Rep.*, **7**, 15301 (2017). DOI: 10.1038/s41598-017-15561-9
- [8] А.М. Иванов, А.В. Клочков. *Опт. и спектр.*, **133** (4), 390 (2025). DOI: 10.61011/OS.2025.04.60535.7296-24
- [9] A.V. Klyuev, A.V. Yakimov. *Physica B: Condensed Matter*, **440**, 145 (2014). DOI: 10.1016/j.physb.2014.01.021
- [10] А.В. Клюев. *Наноматериалы и наноструктуры-XXI век*, **5** (1), 42 (2014).
- [11] И. Фролов, В. Сергеев, О. Радаев. *Полупроводниковая светотехника*, **1**, 12 (2023).
- [12] О.А. Радаев, И.В. Фролов, В.А. Сергеев, С.А. Зайцев. *Контроль. Диагностика*, **28** (7), 61 (2025). DOI: 10.14489/td.2025.07.pp.061-066
- [13] И.В. Фролов. *Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, **16** (4), 441 (2024). DOI: 10.17725/rensit.2024.16.441
- [14] О.А. Радаев, В.А. Сергеев, И.В. Фролов. *Измерительная техника*, **8**, 42 (2019). DOI: 10.32446/0368-1025it.2019-8-42-46
- [15] В.А. Сергеев, О.А. Радаев, И.В. Фролов. *Приборы и техника эксперимента*, **6**, 103 (2023). DOI: 10.31857/S0032816223060071
- [16] L.W. Xu, K.Y. Qian. *IEEE Photonics J.*, **9**(4), 8201309 (2017). DOI: 10.1109/JPHOT.2017.2703851
- [17] С.Г. Никифоров. *Разработка средств измерений и методов контроля параметров полупроводниковых излучателей на основе соединений $A^{III}B^V$, используемых в высоконадежных приборах*. Докт. дис. (Московский институт электронной техники, М., 2015).
- [18] A. Di Vito, A. Pecchia, A. Di Carlo, M. Auf der Maur. *Japan. J. Appl. Phys.*, **58**, SCCC03 (2019). DOI: 10.7567/1347-4065/ab06ba
- [19] R. Butté, L. Lahourcade, T.K. Uždavinyš, G. Callsen, M. Mensi, M. Glauser, G. Rossbach, D. Martin, J.-F. Carlin, S. Marcinkevičius, N. Grandjean. *Appl. Phys. Lett.*, **112** (3), 032106 (2018). DOI: 10.1063/1.5010879