УДК 628.9.038

Ключевые слова: светодиод, электролюминесценция, внутренняя квантовая эффективность, измерение, АВС-модель рекомбинации

Илья Фролов, к. т. н., доцент | ilya-frolov88@mail.ru |
Вячеслав Сергеев, д. т. н., профессор | Олег Радаев

Способ определения внутренней квантовой эффективности светодиода

по ватт-амперной характеристике

В статье представлен способ определения внутренней квантовой эффективности InGaN-светодиодов по результатам измерений ватт-амперной характеристики. Способ основан на АВС-модели рекомбинации носителей заряда в InGaN/GaN-гетероструктуре и заключается в измерении ватт-амперной характеристики светодиода в диапазоне от микротоков до номинального рабочего тока, определении тока, при котором достигается максимальное значение квантовой эффективности, и расчете внутренней квантовой эффективности по функциональной зависимости, в которую входят значения мощности излучения светодиода при двух токах, соответствующих диапазону роста квантовой эффективности. Представлена апробация способа на коммерчески доступных светодиодах. Показано, что результаты измерений согласуются с результатами, полученными известными способами. Преимуществом представленного способа является отсутствие строгих ограничений по выбору значений токов, используемых в расчетах, и возможность реализации в нормальных условиях на общедоступном измерительном оборудовании.

Введение

Для оценки энергетической эффективности светодиодов наиболее часто используются такие параметры, как коэффициент полезного действия и световая отдача. Они позволяют оценить долю электрической мощности, преобразуемой в мощность оптического излучения или в световой поток соответственно [1]. Их значения определяются не только параметрами активной области светодиода, в которой электрический ток преобразуется в оптическое излучение, но и конструктивными особенностями светодиода, в том числе эффективностью вывода излучения.

Параметром, который также определяет эффективность преобразования электрического тока в оптическое излучение, но характеризует свойства активной области светодиода, определяется качеством эпитаксиальных слоев и содержит важную информацию о рабочих механизмах, таких как скорость электронно-дырочной рекомбинации, плотность дефектов и перенос носителей заряда, является внутренняя квантовая эффективность (internal quantum efficiency, *IQE*) [1–3]. Она определяется как отношение числа фотонов, рожденных в активной области светодиода в единицу времени, к числу инжектированных электронов [2]. Внутренняя квантовая эффективность светодиода — это безразмерная величина, которая может принимать значения в диапазоне 0–1.

Для измерения внутренней квантовой эффективности применяются методы, которые условно можно разделить на две группы. Первую группу образуют методы, основанные на измерениях температурной зависимости электро- или фотолюминесценции светодиода в диапазоне от единиц кельвин до рабочих температур [1, 4–6]. Такие методы предполагают, что при криогенных температурах реализуется только излучательная рекомбинация носителей заряда, при этом внутренняя квантовая эффективность считается равной 1. При других температурах значение эффективности определяется по температурной зависимости люминесценции. Эти методы характеризуются сложностью аппаратной реализации, что затрудняет их применение в рабочих условиях эксплуатации.

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

Во вторую группу входят методы, основанные на определении параметров ABC-модели рекомбинации носителей заряда в светоизлучающих гетероструктурах и определении внутренней квантовой эффективности по функциональным зависимостям, связывающим рекомбинационные параметры ABC-модели со статическими [7–10] и динамическими [11] параметрами электролюминесценции светодиода. Способ, представленный в работе [9], основан на измерении зависимости от тока I сигнала фотоприемника L_{ext}, который пропорционален мощности излучения, вычислении внешней квантовой эффективности $\eta_{ext}(I) \sim L_{ext}(I)/I$ в относительных единицах и аппроксимации зависимости $\eta_{ext}^{-1}(I) - L_{ext}(I)^{-1/2}$ в диапазоне малых токов линейной функцией вида $\eta_{ext}^{-1}(I) = \eta_{extr}^{-1} + Sl \times L_{ext}(I)^{-1/2}$, где η_{extr} — коэффициент оптического вывода излучения, Sl — крутизна аппроксимирующей функции. Внутренняя квантовая эффективность $\eta_{IQE}(I)$ рассчитывается по формуле: $\eta_{IQE}(I) = \eta_{extr} \times \eta_{ext}(I)$.

Способ, предложенный авторами работы [10], состоит в измерении ватт-амперной характеристики светодиода P-I, определении тока I_p, при котором внешняя квантовая эффективность достигает максимального значения, вычислении параметров $Y = I/I_p$ и $X = (P(I)/P(I_p))^{0,5}$, аппроксимации зависимости Y-X функцией вида $Y(X) = a_1X + a_2X^2$, определении тока I_{ref}, при котором коэффициент a_2 принимает минимальное значение, и расчете внутренней квантовой эффективности по формуле $\eta_{IQE}(I) = \eta_{IQE}(I_{ref}) \times \eta_{EQE}(I) / \eta_{EQE}(I_{ref})$. Точность измерения внутренней квантовой эффективности зависит не только от точности измерения ватт-амперной характеристики, но и от точности определения экстремумов аппроксимирующих функций.

В статье представлены описание и результаты экспериментальной апробации способа определения внутренней квантовой эффективности светодиода путем измерений его ватт-амперной характеристики и расчетов по функциональным зависимостям, полученным на основе ABC-модели [12]. Преимуществом представленного способа измерений по сравнению с известными является отсутствие строгих ограничений по выбору значений токов, используемых в расчетах, а также возможность уменьшения аппаратных затрат при реализации.

Описание способа измерений

В простейшем случае ABC-модель предполагает, что существует три основных канала рекомбинации носителей заряда, инжектированных в активную область гетероструктуры: канал безызлучательной рекомбинации Шокли — Рида — Холла, канал излучательной межзонной рекомбинации и канал безызлучательной Оже-рекомбинации [13, 14]. При отсутствии утечки носителей заряда из активной области полный ток I светодиода определяется через рекомбинационные параметры следующим образом:

$$I = \frac{eV}{\eta_{inj}}\left(An + Bn^2 + Cn^3\right), \tag{1}$$

где e — элементарный заряд; V — объем активной области гетероструктуры; η_{inj} — коэффициент инжекции носителей заряда в активную область; A, B и C — коэффициенты безызлучательной рекомбинации по механизму Шокли — Рида — Холла, излучательной рекомбинации и безызлучательной Оже-рекомбинации соответственно; n — концентрация носителей заряда в активной области гетероструктуры.

Внутренняя квантовая эффективность определяется как отношение скорости излучательной рекомбинации к полной скорости рекомбинации [3]:

$$\eta_{IQE}(n) = \frac{eVBn^2}{I(n)} = \eta_{inj}\frac{Bn^2}{An + Bn^2 + Cn^3}. \tag{2}$$

Простейшая ABC-модель имеет следующие ограничения [11]:

1. Утечкой электронов от активной области пренебрегают, обеспечивая баланс между током, протекающим через структуру светодиода, и интегральной скоростью рекомбинации.
2. Неравновесные концентрации электронов n и дырок p в активной области светодиода считаются равными.
3. Предполагается, что коэффициенты A, B и C не зависят от концентрации носителей заряда (от тока).

Эти условия в большей степени реализуются при малых концентрациях n носителей заряда в активной области.

При малых токах (до десятков микроампер) основными конкурирующими механизмами являются излучательная рекомбинация и рекомбинация Шокли — Рида — Холла, а влиянием Оже-рекомбинации можно пренебречь. В этом случае третье слагаемое в ABC-модели обращается в ноль: $Cn^3 \approx 0$, и выражение (1) для полного тока светодиода примет вид:

$$I \approx \frac{eV}{\eta_{inj}}\left(An + Bn^2\right), \tag{3}$$

а выражение (2) для внутренней квантовой эффективности соответственно

$$\eta_{IQE}(n) \approx \eta_{inj}\frac{Bn^2}{An + Bn^2} = \eta_{inj}\left(\frac{A}{Bn} + 1\right)^{-1}. \tag{4}$$

По мере увеличения тока I и концентрации носителей n излучательная рекомбинация становится доминирующей, квантовая эффективность светодиода возрастает. При очень высоких уровнях тока Оже-процесс преобладает над другими видами рекомбинации, квантовая эффективность спадает. Эффект спада квантовой эффективности при больших токах известен как efficiency droop effect [1].

Мощность излучения, образованного в активной области светодиода, P_{int} прямо пропорциональна скорости излучательной рекомбинации:

$$P_{int} = V\frac{hc}{\lambda}Bn^2, \tag{5}$$

где h — постоянная Планка; c — скорость света; λ — длина волны излучения.

Не все фотоны, образованные в активной области, излучаются светодиодом: часть фотонов может поглощаться подложкой, защитным покрытием или материалом линзы. Доля фотонов, излученных светодиодом, определяется коэффициентом оптического вывода излучения η_{extr}, значение которого меньше 1. Коэффициент η_{extr} в основном определяется свойствами материалов, из которых изготовлен светодиод, и конструкцией светодиода и слабо зависит от тока светодиода [1].

Мощность излучения, выходящего за пределы светодиода, равна:

$$P = \eta_{extr}P_{int}. \tag{6}$$

Если из (3) выразить концентрацию носителей заряда n:

$$n = \frac{-A + \sqrt{A^2 + \dfrac{4\eta_{inj}B}{eV}I}}{2B} = \frac{A}{2B}\left(-1 + \sqrt{1 + \frac{4\eta_{inj}}{eV}\frac{B}{A^2}I}\right), \tag{7}$$

и подставить полученное выражение (7) в (6), то с учетом (5) можно записать выражение для ватт-амперной характеристики светодиода в виде:

$$P(I)=\eta_{extr}V\frac{hc}{\lambda}\frac{A^2}{2B}\times$$

$$\times\left(1-\sqrt{1+\frac{4\eta_{inj}}{eV}\frac{B}{A^2}I}+\frac{2\eta_{inj}}{eV}\frac{B}{A^2}I\right). \qquad (8)$$

Введем обозначения:

$$m=\eta_{extr}V\frac{hc}{\lambda}\frac{A^2}{2B} \text{ и } q=\frac{\eta_{inj}}{eV}\frac{2B}{A^2}.$$

Тогда ватт-амперная характеристика светодиода при малых токах, при которых влияние Оже-рекомбинации не существенно, может быть представлена выражением:

$$P(I)=m\left(1-\sqrt{1+2qI}+qI\right)=$$

$$=\frac{m}{2}\left(\sqrt{1+2qI}-1\right)^2. \qquad (9)$$

В формуле (9) коэффициент m определяет уровень оптической мощности светодиода, а q — «коэффициент формы» — определяет кривизну ватт-амперной характеристики.

Чтобы получить зависимость внутренней квантовой эффективности от тока, подставляем выражение для концентрации носителей заряда (7) в (4) и с учетом принятых обозначений при условии $\eta_{inj}\approx 1$ получаем:

$$\eta_{IQE}(I)=\frac{\sqrt{1+2qI}-1}{\sqrt{1+2qI}+1}. \qquad (10)$$

Для определения параметра q нужно измерить мощность излучения светодиода $P(I_1)$ и $P(I_2)$ при двух малых токах I_1 и I_2 ($I_1< I_2$) и решить систему уравнений:

$$\begin{cases} P(I_1)=\frac{m}{2}\left(\sqrt{1+2qI_1}-1\right)^2, \\ P(I_2)=\frac{m}{2}\left(\sqrt{1+2qI_2}-1\right)^2. \end{cases} \qquad (11)$$

Ток I_2 выбирают из диапазона значений, при которых внешняя квантовая эффективность возрастает и действием Оже-рекомбинационной составляющей можно пренебречь. Для выполнения этого условия ток I_2 должен быть в 5–10 раз меньше, чем ток I_{max}, при котором достигается максимум внутренней квантовой эффективности. Максимальное значение эффективности современных InGaN-светодиодов достигается при плотностях тока порядка 1–10 А/см². Выбор значения тока I_1 для измерения мощности излучения $P(I_1)$ определяется точностью ваттметра, используемого для измерения ватт-амперной характеристики светодиода, поэтому ток I_1 выбирают наименьшим, при котором обеспечивается заданный уровень точности.

Решаем систему уравнений (11) относительно параметра q, результат подставляем в (10) и получаем окончательное выражение для определения внутренней квантовой эффективности по результатам измерений ватт-амперной характеристики:

$$\eta_{IQE}(I)=\frac{I_1\sqrt{P(I_2)}-I_2\sqrt{P(I_1)}}{P(I_1)\sqrt{P(I_2)}-P(I_2)\sqrt{P(I_1)}}\cdot\frac{P(I)}{I}. \qquad (12)$$

Таким образом, чтобы определить внутреннюю квантовую эффективность светодиода, нужно измерить его ватт-амперную характеристику $P(I)$ в диапазоне токов от единиц микроампер до рабочих токов, определить ток I_{max}, при котором характеристика $P(I)/I$ достигает максимального значения, выбрать токи I_1 и I_2 из условия $I_2\leq 0{,}1I_{max}$, $I_1< I_2$ и рассчитать значение $\eta_{IQE}(I)$ по формуле (12).

Экспериментальная апробация способа измерений

Способ измерений внутренней квантовой эффективности апробирован на коммерчески доступных маломощных светодиодах двух типов: КИПД40Т20-С1-П7 синего свечения с длиной волны максимума спектра излучения 470 нм при токе 20 мА и КИПД40У20-Л5-П7 зеленого свечения с длиной волны максимума спектра излучения 525 нм при токе 20 мА. Рабочее значение тока светодиодов обоих типов составляет 20 мА.

Измерения ватт-амперной характеристики проводились в диапазоне токов 10 мкА — 25 мА на измерительной установке, представленной в [15]. Принцип работы установки заключается в задании прецизионным источником линейно нарастающего тока через исследуемый

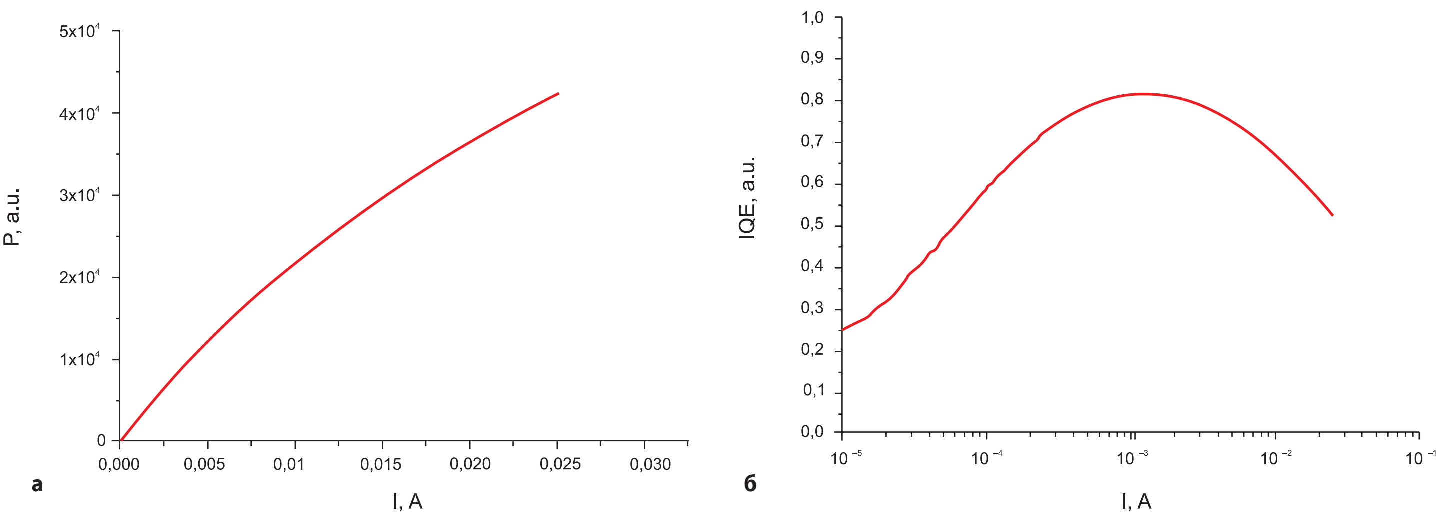

Рис. 1. а) Ватт-амперная характеристика и б) внутренняя квантовая эффективность светодиода типа КИПД40У20-Л5-П7

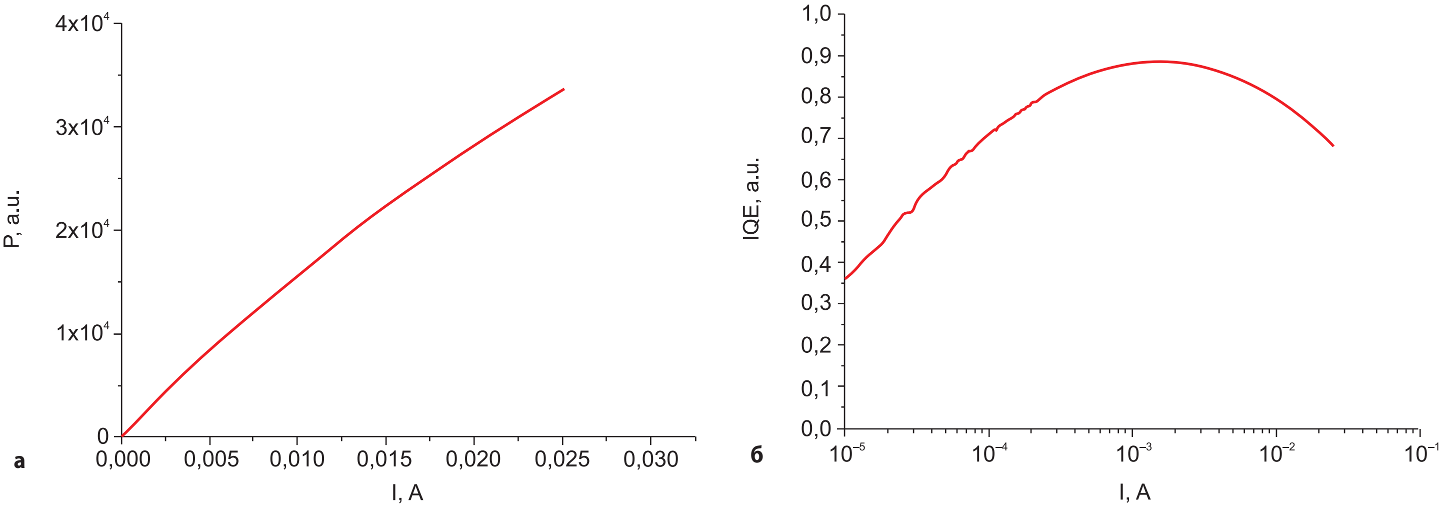

Рис. 2. а) Ватт-амперная характеристика и б) внутренняя квантовая эффективность светодиода типа КИПД40Т20-С1-П7

светодиод, регистрации сигнала, пропорционального мощности излучения светодиода, высокочувствительным фотоприемником на основе быстродействующего фотодиода и малошумящего трансимпедансного усилителя.

Напряжение на выходе фотоприемника, регистрирующего оптическое излучение светодиода, прямо пропорционально мощности излучения светодиода при токе I:

$$U(I) = SP(I), \qquad (13)$$

где S — коэффициент, имеющий размерность (В/Вт) и значение которого определяется чувствительностью фотоприемника, коэффициентом усиления, диаграммами направленности светодиода и фотодиода.

Поскольку коэффициент S не зависит от тока, внутренняя квантовая эффективность может быть определена по формуле:

$$\eta_{IQE}(I) = \frac{I_1\sqrt{U(I_2)} - I_2\sqrt{U(I_1)}}{U(I_1)\sqrt{U(I_2)} - U(I_2)\sqrt{U(I_1)}} \frac{U(I)}{I}. \qquad (14)$$

Напряжение на выходе фотоприемника измерялось 16-разрядным аналого-цифровым преобразователем. Результаты измерений относительных ватт-амперных характеристик светодиодов указанного типа приведены на рис. 1а и 2а соответственно.

На рис. 1б и 2б приведены результаты расчета внутренней квантовой эффективности. Из рисунков видно, что при увеличении тока зависимость $\eta_{IQE}(I)$ возрастает, достигает максимума и спадает. Для синего светодиода максимальное значение квантовой эффективности достигается при токе 1,402 мА и составляет 0,888. Для зеленого светодиода максимальное значение квантовой эффективности достигается при токе 1,264 мА и составляет 0,811. Значения токов, использованные в расчетах, принимались равными $I_1 = 50$ мкА, $I_2 = 100$ мкА. При таких токах фотоприемник, имеющийся в установке, уверенно регистрировал оптический сигнал светодиода.

Таблица 1. Значения внутренней квантовой эффективности зеленого светодиода КИПД40У20-Л5-П7

I, мА	Результат измерения $\eta_{IQE}(I)$ предложенным способом	Результат измерения $\eta_{IQE}(I)$ способом, представленным в [9]	Результат измерения $\eta_{IQE}(I)$ способом, представленным в [10]
1,264	0,811	0,812	0,815
20	0,558	0,559	0,561

Таблица 2. Значения внутренней квантовой эффективности синего светодиода КИПД40Т20-С1-П7

I, мА	Результат измерения $\eta_{IQE}(I)$ предложенным способом	Результат измерения $\eta_{IQE}(I)$ способом, представленным в [9]	Результат измерения $\eta_{IQE}(I)$ способом, представленным в [10]
1,402	0,888	0,872	0,885
20	0,717	0,704	0,714

Выполнено сравнение результатов измерения внутренней квантовой эффективности, полученных представленным способом и способами, описанными в работах [9, 10], при двух токах: при токе I_{max}, в окрестности которого функция $\eta_{IQE}(I)$ достигает максимума, и при рабочем токе 20 мА. Результаты приведены в таблицах 1 и 2.

Наибольшая относительная разница между результатами измерений, полученными предложенным способом и известными способами, составляет 1,8%.

Заключение

Разработан и экспериментально апробирован новый способ определения внутренней квантовой эффективности InGaN-светодиодов. В основе способа лежит ABC-модель рекомбинации носителей заряда в гетероструктуре. Способ заключается в измерении ватт-амперной характеристики светодиода $P(I)$ в диапазоне тока от единиц микроампер до номинального рабочего значения тока, расчете значений функции $P(I)/I$, определении внутренней квантовой эффективности светодиода по функциональной зависимости, в которую входят значения мощности излучения светодиода при двух токах, соответствующих диапазону роста квантовой эффективности. Способ апробирован на коммерческих светодиодах зеленого и синего свечения. ●

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания.

Литература

1. Shim J.-I., Shin D.-S. Measuring the internal quantum efficiency of light-emitting diodes: towards accurate and reliable room-temperature characterization // Nanophotonics. 2018. Vol. 7. No. 10.
2. Marcinkevicius S., Yapparov R., Chow Y. C. et al. High internal quantum efficiency of long wavelength InGaN quantum wells // Applied Physics Letters. 2021. Vol. 119.
3. Wang L., Jin J., Mi C., Hao Z., Luo Y., Sun C., Han Y., Xiong B., Wang J. and Li H. A Review on Experimental Measurements for Understanding Efficiency Droop in InGaN-Based Light-Emitting Diodes // Materials. 2017. Vol. 10.
4. Lu B., Wang L., Hao Z. et al. Study on Optical Properties and Internal Quantum Efficiency Measurement of GaN-based Green LEDs // Appl. Sci. 2019. Vol. 9.
5. Sidikejiang S., Henning P., Horenburg P. et al. Low-temperature internal quantum efficiency of GaInN/GaN quantum wells under steady-state conditions // Semiconductor Science and Technology. 2022. Vol. 37.
6. Wang Y., Pan M., Li T. Comprehensive study of internal quantum efficiency of high-brightness GaN-based light-emitting diodes by temperature-dependent electroluminescence method // Proc. SPIE 9003, Light-Emitting Diodes: Materials, Devices, and Applications for Solid State Lighting XVIII, 90030D. 27 February 2014.
7. Han D.-P., Yamamoto K., Ishimoto S., Iwaya M., Takeuchi T., Kamiyama S., and Akasaki I. Determination of internal quantum efficiency in GaInN-based light-emitting diode under electrical injection: carrier recombination dynamics analysis // Applied Physics Express. 2019. Vol. 12.
8. Pristovsek M., Bao A., Oliver R. A. Effects of Wavelength and Defect Density on the Efficiency of (In,Ga)N-Based Light-Emitting Diodes // Physical Review Applied. 2017. Vol. 7.
9. Opdorp C. van, and Hooft G. W.'t. Method for determining effective nonradiative lifetime and leakage losses in double-heterostructure lasers // Journal of Applied Physics. 1981. Vol. 52.
10. Shim J.-I., Han D.-P., Oh C.-H. et al. Measuring the Internal Quantum Efficiency of Light-Emitting Diodes at an Arbitrary Temperature // IEEE Journal of Quantum Electronics. 2018. Vol. 54. No. 2.
11. Фролов И. В. Измерение внутреннего квантового выхода излучения InGaN светодиода // И. В. Фролов, В. А. Сергеев, О. А. Радаев // Журнал технической физики. 2021. Т. 91. Вып. 8.
12. Фролов И. В., Сергеев В. А. Патент 2789118 РФ, МПК H01L 33/00. Способ измерения внутреннего квантового выхода светодиода. Заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук. № 2022120518; заявл. 26.07.2022; опубл. 30.01.2023. Бюл. № 4.
13. Karpov S. ABC-model for interpretation of internal quantum efficiency and its droop in III-nitride LEDs: a review // Opt. Quantum Electron. 2015. Vol. 47. No. 6.
14. David A., Young N. G., Lund C., Craven M. D. Review — The Physics of Recombinations in III-Nitride Emitters // ECS Journal of Solid State Science and Technology. 2020. Vol. 9.
15. Сергеев В. А., Радаев О. А., Фролов И. В., Черторийский А. А. Оценка качества гетеропереходных светодиодов по уровню порогового тока // Известия вузов. Электроника. 2017. Т. 22. № 1.