Экспресс-способ получения электролюминесцентных характеристик $p-i-n$-структур с квантовыми ямами при возбуждении лазерным излучением

© М.А. Минтаиров, В.В. Евстропов, Д.А. Малевский, С.А. Минтаиров, П.В. Покровский, Р.А. Салий, Н.А. Калюжный

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: mamint@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 5 мая 2026 г.
В окончательной редакции 4 июня 2026 г.
Принята к публикации 23 июля 2026 г.

Предложен новый метод нахождения параметров ABC-модели для определения внутреннего квантового выхода гетероструктур светоизлучающих диодов, не требующий проведения полного цикла изготовления приборов. Эпитаксиальная гетероструктура светоизлучающего диода с нанесенными никелевыми контактами освещалась лазером, при этом $p-n$-переход структуры работал в режиме холостого хода. Была получена зависимость интенсивности люминесценции L от уровня световой мощности лазера P_{las} (фото-ЭЛ), родственная люкс-амперной ($L-J$) зависимости. Измеренная зависимость L от тока, подаваемого на контакты, позволила достроить полную зависимость $L-P_{las}$ в область, где лазерное излучение перегревало образец. Проведен анализ полученных зависимостей $L/P_{las}-P_{las}$, который позволил получить искомые параметры ABC-модели для светоизлучающего диода на основе AlGaAs/GaAs-гетероструктуры с множественными квантовыми ямами.

Ключевые слова: светоизлучающий диод, МОГФЭ, внутренняя квантовая эффективность, электролюминесценция, ABC-модель.

DOI: 10.61011/FTP.2026.06.63897.9746

Светоизлучающие диоды (СИД) ближнего инфракрасного диапазона находят применение во многих сферах [1–3]. Одной из главных задач при их разработке является достижение максимальной эффективности преобразования электрического тока в свет. Для этого используют сложные гетероструктуры с множественными квантовыми ямами (МКЯ). Чтобы такие приборы работали эффективно, полупроводниковые слои должны иметь кристаллическую структуру высокого качества, а их параметры — толщина, уровень легирования и конфигурация МКЯ — требуют точной оптимизации.

Поиск оптимальной конструкции — это сложный процесс, требующий проведения большого количества экспериментов. Обычно при оптимизации СИД опираются на вольт-амперные и люкс-амперные характеристики, а также на значение внешнего квантового выхода [4–6]. Однако ключевой показатель — внутренний квантовый выход (IQE) — невозможно измерить напрямую экспериментальным путем. Его определяют через расчеты, анализируя зависимость эффективности от тока (в рамках так называемой ABC-модели), что позволяет понять, как именно распределяются потери энергии в активной области кристалла [6–11].

Существенная сложность заключается в том, что текущие методы оценки IQE подходят только для полностью готовых изделий. При этом изготовление светодиода включает длинную цепочку этапов: от переноса на подложку-носитель и текстурирования поверхности до монтажа линз и теплоотводов. В итоге внешний квантовый выход, который мы видим на практике, зависит не только от качества самого кристалла (IQE), но и от того, насколько эффективно свет выводится наружу, что определяется уже качеством сборки и последующей обработки.

Таким образом, экспериментально измеряемая величина внешнего квантового выхода СИД, хотя и пропорциональна величине IQE, но через коэффициент оптического вывода излучения, который многофакторно зависит от целого комплекса постростовых и инженерных процессов при изготовлении прибора.

В данной статье предложен новый метод нахождения параметров ABC-модели, что в конечном счете позволяет оценить свойства непосредственно полупроводниковой гетероструктуры. Метод не требует проведения полного цикла изготовления приборов и базируется на анализе характеристик, получаемых от тестовых образцов активной области СИД. Данный метод является эффективным инструментом для оптимизации активной области и дизайна структуры СИД.

В основе предлагаемого метода лежит нормализация фотоэлектролюминесцентных (ЭЛ) зависимостей, измеряемых освещением лазером поверхности контрольных образцов СИД, получаемых экспресс-изготовлением из гетероструктур СИД посредством электрохимического осаждения экспресс-контактов из никеля на лицевую и тыльную поверхности подложки. Нормализация про-

водится посредством „сращивания“ фото-ЭЛ и люкс-амперных характеристик, получаемых при пропускании тока через никелевые экспресс-контакты, что позволяет расширить фото-ЭЛ характеристику в область больших мощностей лазера. Это необходимо потому, что при некоторой падающей мощности лазерное излучение начинает перегревать структуру контрольного образца СИД. При этом мощность лазера, при которой возникает перегрев структуры, и, соответственно, диапазон применимости фото-ЭЛ данных для „сращивания“ с люкс-амперными данными оцениваются через анализ зависимости напряжения холостого хода, возникающего между контактами контрольных образцов при освещении их лазером, от мощности лазерного излучения.

Предложенный метод был применен к структуре СИД на основе AlGaAs/GaAs. Для этого методом металлорганической газофазной эпитаксии была выращена тестовая $p-i-n$-структура активной области СИД с МКЯ на подложке GaAs n-типа проводимости. СИД был разработан для генерации излучения длиной волны 850 нм и включал 5 КЯ AlGaAs/GaAs. Для предлагаемой экспресс-методики оценки IQE СИД использовался лазер с известной зависимостью оптической мощности от тока, пропускаемого через него (рис. 1).

На первой стадии через контактные площадки пропускался электрический ток, что позволило получить зависимость интенсивности ЭЛ (L) от тока (J). При этом очевидно, что большая часть тока протекает под контактом, но частично ток растекается и вдоль $p-n$-перехода, что позволяет регистрировать ЭЛ излучение. Также очевидно, что полученная $L-J$ зависимость пропорциональна $L-J$ зависимости, которую можно было бы получить при полном изготовлении СИД.

Как известно, IQE приставляет собой отношение интенсивности ЭЛ к току, а истинная зависимость IQE от концентрации носителей может быть описана при помощи так называемой ABC-модели. ABC-модель — это физическая модель, используемая для описания процессов рекомбинации носителей заряда в полупроводниковых структурах, в частности в светоизлучающих гетероструктурах. При этом IQE, согласно этой модели, представляется в виде

$$IQE = \frac{B \cdot n^2}{A \cdot n + B \cdot n^2 + C \cdot n^3}, \qquad (1)$$

где n — концентрация носителей заряда в активной области, A — коэффициент безызлучательной рекомбинации по механизму Шокли–Рида–Холла, B — коэффициент бимолекулярной излучательной рекомбинации, C — коэффициент оже-рекомбинации.

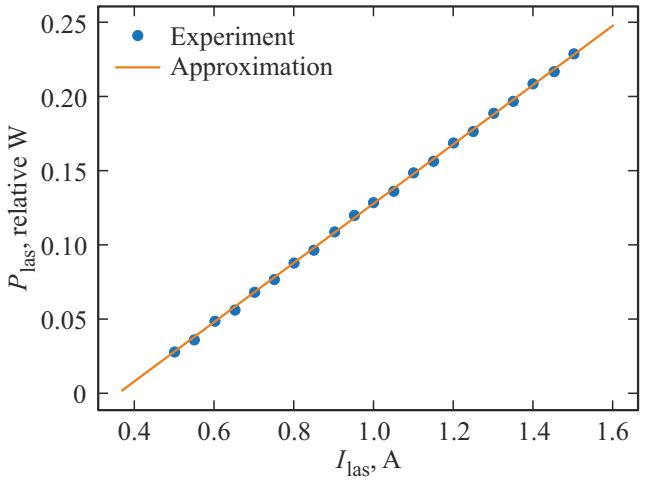


Рис. 1. Зависимость оптической мощности лазера, используемого в экспериментах, от тока, пропускаемого через него.

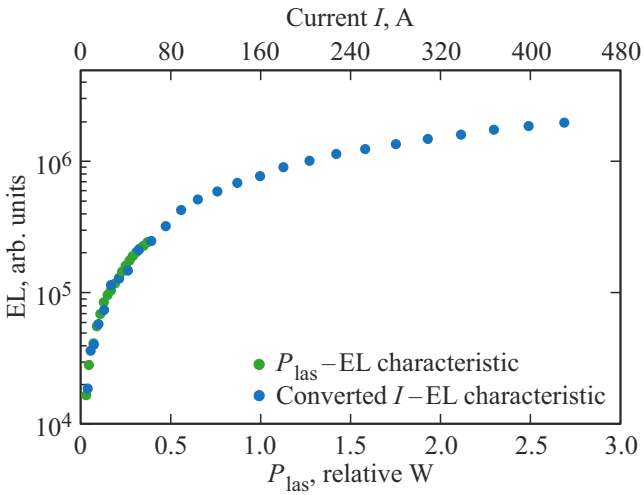


Рис. 2. Экспериментальная зависимость интенсивности ЭЛ (L) от мощности лазера (P_{las}): зеленые точки — область, где нет перегрева контрольного образца СИД лазерным излучением.

В предлагаемом методе, как уже говорилось ранее, производится „сращивание“ (нормализация) полученной $L-J$ зависимости с фото-ЭЛ зависимостью. Для этого структура освещалась лазером, излучение которого поглощалось $p-i-n$-переходом, что приводило к генерации в структуре фототока. При этом $p-n$-переход структуры работал в режиме холостого хода, что приводило к возникновению ЭЛ излучения, аналогичного пропусканию тока через структуру СИД. Таким образом, измерения зависимости L от уровня световой мощности лазера (P_{las}) позволяют получить зависимость $L-P_{las}$, родственную люкс-амперной ($L-J$) зависимости СИД (рис. 2). Однако при этом необходимо учитывать возможный нагрев структуры лазерным излучением. Для оценки диапазона достоверности зависимости $L-P_{las}$ измерялась зависимость напряжения холостого хода (V_{OC}) от P_{las} (рис. 3).

Для этого на поверхности СИД направлялось лазерное излучение, при этом пятно лазера попадало в область, близкую к контактным площадкам. Излучение, попадающее на открытую поверхность, поглощалось в $p-n$-переходе структуры, генерируя фотоэдс и фототок.

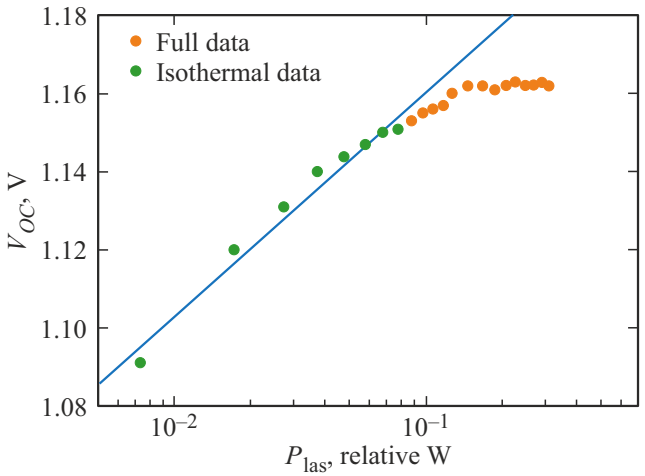


Рис. 3. Зависимость напряжения холостого хода (V_{OC}) контрольного образца СИД от мощности лазерного излучения (P_{las}): зеленые точки — область, где зависимость подчиняется уравнению (3), оранжевые точки — область перегрева контрольного образца СИД лазерным излучением.

Как известно, когда СИД работает в максимуме IQE, его вольт-амперная характеристика (ВАХ) описывается следующим законом:

$$J = J_0 \cdot e^{q \cdot V}/k \cdot T, \tag{2}$$

где J_0 — ток насыщения, q — заряд электрона, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура.

При этом $V = V_{OC}$, $J = J_{\text{photo}}$, где J_{photo} — фототок, который, очевидно, пропорционален падающей световой мощности P_{las}. Поэтому зависимость $V_{OC}-P_{las}$ будет иметь схожий экспоненциальный вид:

$$P_{las} = P_{las0} \cdot e^{q \cdot V}/k \cdot T, \tag{3}$$

где P_{las0} — коэффициент, связывающий фототок и мощность лазерного излучения, поглощающегося в структуре контрольного образца. Однако из-за нагрева структуры лазерным излучением экспериментальная зависимость $V_{OC}-P_{las}$ подчиняется закону (3) лишь в диапазоне малых мощностей лазера (рис. 3, зеленые точки). Полученные в этой области зависимости $L-P_{las}$ (рис. 2, зеленые точки) можно считать корректными. Отметим, что, согласно данным работы [12], напряжение холостого хода линейно зависит от температуры перегрева $p-n$-перехода, с коэффициентом $\alpha = 17.9 \cdot 10^{-4}$ В/К. Отклонение точек зависимости $V_{OC}-P_{las}$ составляет порядка $dV_{OC} \approx 0.2$ В, что соответствует перегреву $p-n$-перехода на величину $dT = dV_{OC}/\alpha \approx 11$ К.

В случае нанесения экспресс-контактов при изготовлении контрольных образцов СИД форма и размер этих контактов могут быть различными, поэтому, для того чтобы исключить влияние этих факторов, зависимости $L-P_{las}$ и $L-J$ „сращиваются“ посредством нормализующих коэффициентов. Для этого использовались два множителя: k_1, на который умножается ток, и k_2, на который умножается интенсивность ЭЛ. При этом k_1 характеризует связь тока J из $L-J$ зависимости и фототока, возникающего при освещении лазером открытой поверхности. Если бы контакты были прозрачными и площадью, равной площади лазерного пучка, то k_1 равнялся бы единице. Коэффициент k_2 показывает, насколько контакты ослабляют выходящее излучение, и, если бы они были прозрачными, k_2 равнялся бы единице.

Важно отметить, что при пропускании тока через контрольные образцы СИД нагревом структуры можно пренебречь в гораздо больших диапазонах интенсивности ЭЛ, чем в случае освещения поверхности лазером. Таким образом, „сращивание“ $L-P_{las}$ и $L-J$ характеристик позволяет значительно расширить диапазон $L-P_{las}$ зависимости. Итоговая $L-P_{las}$ характеристика может быть получена для набора контрольных образцов СИД.

По построению эксперимента видно, что если проводить сравнительный анализ нескольких контрольных образцов СИД и при этом оставлять площадь, освещаемую лазером, одинаковой, то получаемые зависимости могут быть сравнены между собой.

Для нахождения квантовой эффективности контрольных образцов СИД в предлагаемой методике вместо анализа отношения интенсивности ЭЛ к току предлагается использовать схожую зависимость интенсивности ЭЛ к мощности лазерного излучения, так как зависимость L/P_{las}, очевидно, повторяет по форме характеристику IQE. Ввиду того что P_{las} пропорциональна концентрации носителей, заменяя ABC на $A_lB_lC_l$, можно схожей с выражением (1) формулой описать получаемую в эксперименте зависимость $L/P_{las}-P_{las}$:

$$QE = \frac{L_{\text{norm}} \cdot B_1 \cdot P_{las}^2}{A_1 \cdot P_{las} + B_1 \cdot P_{las}^2 + C_1 \cdot P_{las}^3}, \tag{4}$$

где QE — квантовая эффективность, L_{norm} — безразмерный коэффициент, необходимый по причине того, что интенсивность ЭЛ измеряется в относительных единицах.

Результат аппроксимации экспериментальной зависимости $L/P_{las}-P_{las}$ для контрольного образца СИД, разработанного для генерации излучения длиной волны 850 нм и включающего 5 КЯ AlGaAs/GaAs, приведен на рис. 4. Анализ полученных зависимостей позволил получить искомые параметры $A_lB_lC_l$-модели. Это дает возможность проводить сравнительный анализ конструкции эпитаксиальных гетероструктур СИД, в том числе их активной области. Важно отметить, что, строго говоря, QE не является внутренней квантовой эффективностью, однако она пропорциональна IQE и не зависит от процедур изготовления СИД. Именно по предлагаемой в методике величине QE может проводиться корректное сравнение нескольких контрольных образов гетероструктур СИД.

Таким образом, разработана простая экспресс-методика анализа гетероструктур СИД. Метод может

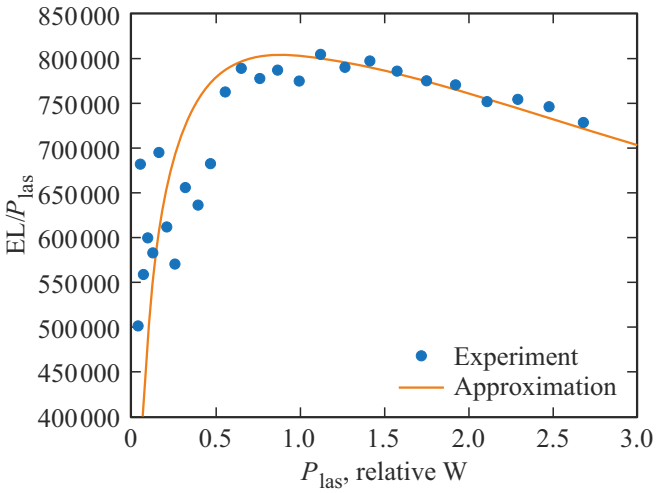


Рис. 4. Экспериментальная зависимость отношения интенсивности ЭЛ (L) к мощности лазерного излучения (P_{las}) от мощности лазерного излучения (символы), а также результат аппроксимации с использованием выражения (4) этой зависимости (линия).

быть применим для поиска оптимальной конструкции активной области $p-i-n$-гетероструктуры СИД на основе МКЯ.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] E.F. Schubert. *Light-emitting diodes*. 2nd ed. (Cambridge, Cambridge University Press, 2006).
[2] M. Vasilopoulou, A. Fakharuddin, F. Pelayo García de Arquer, D.G. Georgiadou, H. Kim, A.R.M. Yusoff, F. Gao, M.K. Nazeeruddin, H.J. Bolink, E.H. Sargent. Nature Photonics, **15**, 656 (2021). DOI: 10.1038/s41566-021-00855-2
[3] V.K. Khanna. *Fundamentals of solid-state lighting* (N.Y., CRC Press, 2014).
[4] K.-S. Kim, D.-P. Han, H.-S. Kim, J.-I. Shim. Appl. Phys. Lett., **104**, 091110 (2014).
[5] D. Zhu, J. Xu, A.N. Noemaun, J.K. Kim, E.F. Schubert, M.H. Crawford, D. Koleske. Appl. Phys. Lett., **94**, 081113 (2009).
[6] G.W. Lee, J.-I. Shim, D.-S. Shin. Appl. Phys. Lett., **109**, 031104 (2016).
[7] J.-I. Shim, D.-S. Shin. IEEE J. Quant. Electron., **52**, 3300208 (2016).
[8] E. Matioli, C. Weisbunch. J. Appl. Phys., **87**, 3497 (2000).
[9] J.-I. Shim, D.-S. Shin. Nanophotonics, **7** (10), 1601 (2018).
[10] Y.-S. Yoo, T.-M. Roh, J.-H. Na, S.J. Son, Y.-H. Cho. Appl. Phys. Lett., **102** (21), 211107 (2013).
[11] M.A. Mintairov, V.V. Evstropov, D.A. Malevsky, P.V. Pokrovskii, N.Yu. Davidyk, N.A. Kalyuzhnyy. J. Luminesc., **288**, 121573 (2025). DOI: 10.1016/j.jlumin.2025.121573
[12] M.A. Mintairov, V.V. Evstropov, S.A. Mintairov, M.Z. Shvarts, N.A. Kalyuzhnyy. J. Phys.: Conf. Ser., **1135** (1), 012070 (2018). DOI:10.1088/1742-6596/1135/1/012070

Редактор А.Н. Смирнов

Express method for obtaining electroluminescent characteristics of $p-i-n$-structures with quantum wells under laser excitation

M.A. Mintairov, V.V. Evstropov, D.A. Malevskiy, S.A. Mintairov, P.V. Pokrovskiy, R.A. Salii, N.A. Kalyuzhnyy

Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract A new method for determining the ABC model parameters to evaluate the internal quantum efficiency of light-emitting diodes is proposed, which does not require a full device fabrication cycle. An epitaxial light-emitting diodes heterostructure with deposited nickel contacts was illuminated by a laser, while the $p-n$-junction operated in open-circuit mode. This yielded a dependence of the luminescence intensity (L) on the laser power level (P_{las}), similar to the light-current ($L-J$) characteristic. The measured dependence of L on the current applied to the contacts allowed for the completion of the full $L-P_{las}$ curve in the region where laser radiation caused sample overheating. An analysis of the resulting $L/P_{las}-P_{las}$ dependencies was performed, enabling the extraction of the required ABC model parameters for an AlGaAs/GaAs-based LED heterostructure.