НАУЧНОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, 2026, том 36, № 4, с. 73–79 *ISSN 0868-5886*

ФИЗИКА ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

УДК 621.382
EDN: DTWMVZ

© С. А. Зайцев, В. А. Сергеев, И. В. Фролов, О. А. Радаев, А. А. Казанков, 2026

ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОРОГОВОГО ТОКА СВЕТОДИОДОВ И КРИСТАЛЛОВ СВЕТОДИОДНЫХ МАТРИЦ ПО ВАТТ-АМПЕРНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

Методом компьютерного моделирования проведен анализ случайных погрешностей определения порогового тока светодиодов и кристаллов светодиодных матриц по результатам измерения мощности излучения при трех токах. Показано, что случайная составляющая погрешности определения порогового тока, возникающая из-за случайной погрешности измерения мощности излучения светодиода фотоприемным устройством, существенно зависит от значений токов, при которых выполняются измерения. Существует сочетание (набор) токов, при которых случайная погрешность определения порогового тока принимает минимальное значение: ток I_1 должен выбираться в окрестности значения q^{-1}, где q — параметр аппроксимирующей функции, определяющей степень нелинейности ватт-амперной характеристики (ВтАХ); значение тока I_3 определяется приближением модели аппроксимирующей функции и составляет 20% значения тока I_{max}, при котором достигается максимум внешней квантовой эффективности светодиода; а ток I_2 выбирается равным половине тока I_3. Значения токов I_1, I_2 и I_3 могут быть определены по результатам измерений ВтАХ на представительной выборке светодиодов.

Ключевые слова: пороговый ток, светодиод, светодиодная матрица, измерения, случайная погрешность

ВВЕДЕНИЕ

Светодиоды и светодиодные матрицы (СМ) в настоящее время широко применяются в системах освещения, системах архитектурной подсветки, в составе бортового светотехнического оборудования, автомобильной оптики, в медицинском оборудовании и других отраслях. Качество и надежность светотехнического оборудования во многом определяется качеством светодиодов и СМ, входящих в его состав. Методы контроля, применяемые на производстве светотехнического оборудования [1–3], основаны на измерении интегральных параметров и характеристик СМ: вольт-амперных характеристик, светового потока, цветовой температуры и др. При этом параметры отдельных кристаллов не контролируются, хотя отказ одного кристалла внутри СМ или существенное отклонение его параметров относительно среднего значения приводит не просто к потере эффективности, а к отказу всей матрицы. Для повышения эффективности контроля качества СМ разрабатываются методы, позволяющие контролировать параметры кристаллов матрицы. Одним из параметров, позволяющих контролировать качество отдельных кристаллов в составе светодиодной матрицы, является пороговый ток [4]. Пороговый ток — минимальный ток, при котором возникает излучение светодиода. В работе [5] показано, что отбраковка по пороговому току светодиодов, склонных к ускоренной деградации, более эффективна, чем отбраковка по прямому падению напряжения.

В работах [4, 5] пороговый ток определяется путем измерения ватт-амперной характеристики (ВтАХ) $P(I)$ светодиода или кристалла СМ в диапазоне микротоков, аппроксимации результатов измерений и определения порогового тока I_{th} как тока, при котором аппроксимирующая функция принимает нулевое значение. При измерении ВтАХ светодиода или кристалла СМ возникает случайная погрешность измерения мощности излучения, обусловленная влиянием шума фотоприемного устройства. Следовательно, случайная составляющая погрешности определения порогового тока зависит от погрешности измерения мощности излучения. Повышение точности определения порогового тока светодиода возможно путем выбора токов для измерений мощности излучения и последующего расчета порогового тока, при которых влияние случайной составляющей погрешности измерения мощности излучения на погрешность определения порогового тока минимизируется.

Цель работы заключалась в анализе методом компьютерного моделирования зависимости случайной погрешности определения порогового тока светодиода или кристалла СМ от уровня случайной составляющей сигнала фотоприемного

устройства и от значения токов, при которых измеряется мощность излучения, а также в определении значений токов, при которых погрешность определения порогового тока принимает минимальное значение.

ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Исходное уравнение для моделирования

Для оценки случайной составляющей погрешности определения порогового тока светодиода методом компьютерного моделирования использовалась функция, подробно описанная в работе [6]:

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

где I_{th} — пороговый ток, а параметры m и q функции (1) определяются параметрами светодиодной гетероструктуры выражениями:

$$m = \eta_{\text{extr}} V \frac{hc}{\lambda} \frac{A^2}{2B}, \qquad (2)$$

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

в которых η_{extr} — коэффициент оптического вывода излучения, V — объем активной области гетероструктуры, h — постоянная Планка, c — скорость света, λ — длина волны излучения, η_{inj} — коэффициент инжекции носителей заряда в активную область, e — элементарный заряд. A, B и C — коэффициенты безызлучательной рекомбинации по механизму Шокли – Рида – Холла, излучательной рекомбинации и безызлучательной Оже-рекомбинации соответственно.

Параметр q функции (1) определяет степень нелинейности ВтАХ: при увеличении q функция приближается к линейной зависимости.

Функция (1) получена на основании общепринятой АВС-модели рекомбинации носителей заряда в светоизлучающих гетероструктурах при условии малости составляющей Оже-рекомбинации в диапазоне микротоков. Указанная функция удовлетворительно аппроксимирует ВтАХ светодиода или кристалла светодиодной матрицы в диапазоне токов $I < 0.2I_{\max}$, где $I_{\max}$ — ток, при котором достигается максимум квантовой эффективности светодиода.

Определение порогового тока

Для определения порогового тока I_{th} достаточно составить и решить систему из уравнений для трех токов I_1, I_2 и I_3:

$$\begin{cases} P_1 = \dfrac{m}{2}\left(\sqrt{1 + 2q(I_1 - I_{\text{th}})} - 1\right)^2, \\ P_2 = \dfrac{m}{2}\left(\sqrt{1 + 2q(I_2 - I_{\text{th}})} - 1\right)^2, \\ P_3 = \dfrac{m}{2}\left(\sqrt{1 + 2q(I_3 - I_{\text{th}})} - 1\right)^2. \end{cases} \qquad (4)$$

Путем деления первого и второго уравнения на третье преобразуем систему уравнений (4) к виду:

$$\begin{cases} a = \dfrac{\sqrt{1 + 2q(I_1 - I_{\text{th}})} - 1}{\sqrt{1 + 2q(I_3 - I_{\text{th}})} - 1}, \\ b = \dfrac{\sqrt{1 + 2q(I_2 - I_{\text{th}})} - 1}{\sqrt{1 + 2q(I_3 - I_{\text{th}})} - 1}, \end{cases} \qquad (5)$$

где $a = \sqrt{P_1 / P_3}$, $b = \sqrt{P_2 / P_3}$.

Выражаем q из первого и второго уравнений системы (5)

$$\begin{cases} q = 2a(1-a)\dfrac{a(I_3 - I_{\text{th}}) + I_{\text{th}} - I_1}{\left(a^2\left(I_3 - I_{\text{th}}\right) + I_{\text{th}} - I_1\right)^2}, \\ q = 2b(1-b)\dfrac{b(I_3 - I_{\text{th}}) + I_{\text{th}} - I_2}{\left(b^2\left(I_3 - I_{\text{th}}\right) + I_{\text{th}} - I_2\right)^2} \end{cases} \qquad (6)$$

и приравниваем правые части уравнений системы (6):

$$a(1-a)\frac{a(I_3 - I_{\text{th}}) + I_{\text{th}} - I_1}{\left(a^2\left(I_3 - I_{\text{th}}\right) + I_{\text{th}} - I_1\right)^2} = b(1-b)\frac{b(I_3 - I_{\text{th}}) + I_{\text{th}} - I_2}{\left(b^2\left(I_3 - I_{\text{th}}\right) + I_{\text{th}} - I_2\right)^2}. \qquad (7)$$

Значение порогового тока I_{th} определяется путем решения нелинейного уравнения (7) численным методом. При моделировании уравнение (7) решалось методом деления отрезка пополам.

Алгоритм оценки случайной составляющей погрешности

Оценка случайной составляющей погрешности определения порогового тока проводилась методом компьютерного моделирования в среде MathCAD по следующему алгоритму:

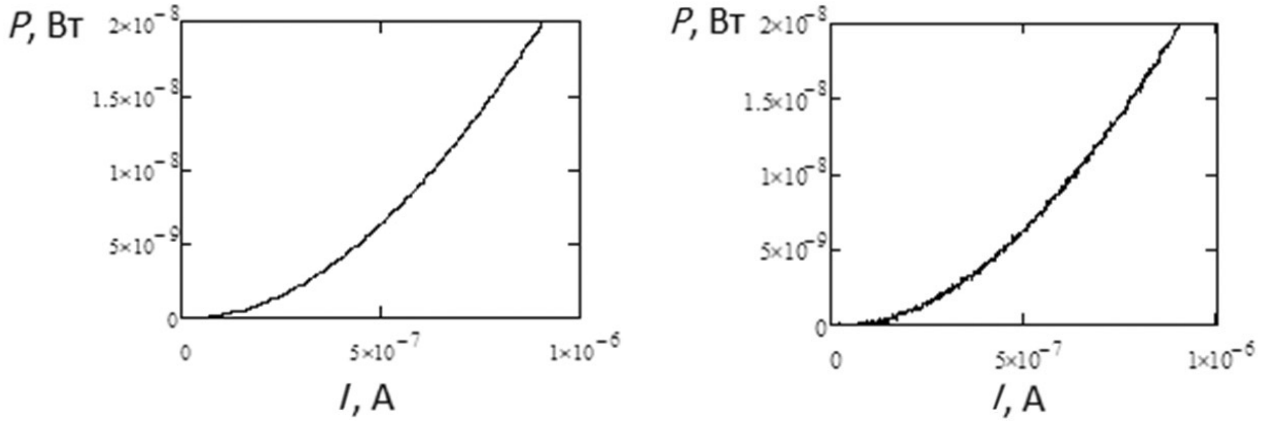

Рис. 1. Модель ватт-амперной характеристики без случайной составляющей погрешности измерений (а) и со случайной составляющей погрешности измерений при $S = 10^{-10}$ Вт (б)

1) моделировалась ватт-амперная характеристика светодиода: задавались численные значения параметров *m, q* и I_{th} и с использованием выражения (1) формировался массив значений мощности излучения светодиода $P_i = P(I_i)$ в диапазоне токов $I_i = I_{\text{th}} \ldots I_{\text{SP}}$ с шагом 1 нА, где I_{SP} — верхнее (предельное) значение тока моделируемой ВтАХ;

2) формировался ансамбль объемом N реализаций ватт-амперных характеристик, искаженных случайной погрешностью измерений; случайная погрешность измерения мощности излучения светодиода фотоприемным устройством моделировалась путем суммирования значений мощности излучения светодиода P_i в каждой i-й точке со случайной величиной Δ_i, имеющей нормальный закон распределения, нулевое среднее значение и среднеквадратическое отклонение S, задаваемое из диапазона $S = 10^{-11} \ldots 10^{-9}$ Вт; пример ВтАХ и реализации ВтАХ со случайной погрешностью измерений приведены в качестве иллюстрации на рис. 1;

3) задавались значения токов $I_3 = I_{\text{SP}}$, $I_2 = = I_{\text{SP}} / 2$; запускался внешний цикл, в котором поочередно устанавливались значения тока I_1 из диапазона $I_1 = I_{\text{th}} \ldots I_2$;

4) запускался внутренний цикл, в котором для каждой j-й ($j = 1,\ldots, N$) реализации ансамбля ВтАХ рассчитывался пороговый ток I_{th_j};

5) по завершению внутреннего цикла рассчитывалось среднее квадратическое отклонение результата определения порогового тока

$$S_0 = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{N}\left(I_{\text{th}_j} - I_{\text{th}}\right)^2}{N\left(N-1\right)}} \qquad (8)$$

и доверительная граница случайной погрешности определения порогового тока в абсолютной

$$\varepsilon = \pm S_0 t_{p,N-1} \qquad (9)$$

и относительной формах

$$\delta = \frac{\varepsilon}{I_{\text{th}}} 100\%, \qquad (10)$$

где $t_{p,N\text{-}1}$ — коэффициент Стьюдента при доверительной вероятности $p = 0.95$;

6) по зависимости $\delta(I_1)$ определялся ток $I_{1_\min}$, при котором случайная погрешность принимает минимальное значение;

7) устанавливались значения токов $I_1 = = I_{1_\min}$, $I_3 = I_{\text{SP}}$; запускался внешний цикл, в котором поочередно устанавливались значения тока I_2 из диапазона $I_2 = I_{1_\min} \ldots I_3$;

8) повторялись процедуры по пп. 4 и 5 и по зависимости $\delta(I_2)$ определялся ток $I_{2_\min}$, при котором случайная погрешность принимает минимальное значение;

9) устанавливались значения токов $I_1 = = I_{1_\min}$, $I_2 = I_{2_\min}$; запускался внешний цикл, в котором поочередно устанавливались значения тока I_3 из диапазона $I_3 = I_{2_\min} \ldots I_{\text{SP}}$;

10) повторялись процедуры по пп. 4 и 5, и по зависимости $\delta(I_3)$ определялся ток $I_{3_\min}$, при котором случайная погрешность принимает минимальное значение $\delta_{\min}$;

11) процедуры по пп. 2–10 повторялись l раз — до тех пор, пока относительная разность значений токов $I_{1_\min}$, $I_{2_\min}$ и $I_{3_\min}$ между k-й и $(k-1)$-й итерациями ($k = 1,\ldots, l$) не станет менее 1%.

Табл. Параметры, определенные при $S = 10^{-10}$ Вт, $I_{th} = 25$ нА

q, $\times 10^5$ А$^{-1}$	q^{-1}, $\times 10^{-6}$ А	I_{1_min}, $\times 10^{-6}$ А	I_{2_min}, $\times 10^{-6}$ А	I_{3_min}, $\times 10^{-6}$ А	δ_{min}, %
1.0	10.0	7.3	59	100	3.0
1.5	6.7	6.0	60	–»–	1.7
2.0	5.0	5.0	61	–»–	1.2
2.5	4.0	4.6	63	–»–	0.9
3.5	2.9	4.1	63	–»–	0.6
5.0	2.0	3.2	69	–»–	0.36
7.0	1.4	2.6	58	–»–	0.24
10.0	1.0	2.4	52	–»–	0.16

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Выполнено моделирование случайных погрешностей определения порогового тока путем решения системы уравнений, составленной для трех значений тока ватт-амперной характеристики светодиода (или кристалла светодиодной матрицы) по представленному алгоритму. Значения параметров m, q и I_{th} задавались на основе априорной информации о параметрах аппроксимирующей функции, полученных ранее для светодиодных матриц Osram серии Duris S8 [7], из диапазона значений: $m = 10^{-6}$ Вт, $q = 10^5 \ldots 10^6$ А$^{-1}$, $I_{th} = 1 \ldots 100$ нА. Ток I_{SP} задавался равным $I_{SP} = 100$ мкА, что обеспечивает выполнение условия $I_{SP} < 0.2 I_{max}$ для светодиодных матриц указанного типа.

Исследованы зависимости доверительной границы случайной погрешности определения порогового тока от токов I_1, I_2 и I_3. Погрешность измерения ВтАХ моделировалась случайной величиной со средним квадратическим отклонением $S = 10^{-10}$ Вт. Значение порогового тока задавалось равным $I_{th} = 25$ нА. В таблице приведены результаты моделирования.

Из результатов табл. следует, что при увеличении параметра q (при уменьшении нелинейности ВтАХ) уменьшается ток I_{1_min}, а значения токов I_{2_min} и I_{3_min} слабо изменяются при изменении q.

На рис. 2 показан график зависимости $I_{1_min}(q^{-1})$, который удовлетворительно аппроксимируется (коэффициент детерминации $R^2 = 0.97$) линейной функцией. При $q = 200\,000$ А$^{-1}$ $I_{1_min} = q^{-1}$.

На рис. 3 показаны зависимости доверительной границы случайной погрешности определения порогового тока от токов I_1, I_2 и I_3 при $q = 2.5 \cdot 10^5$ А$^{-1}$.

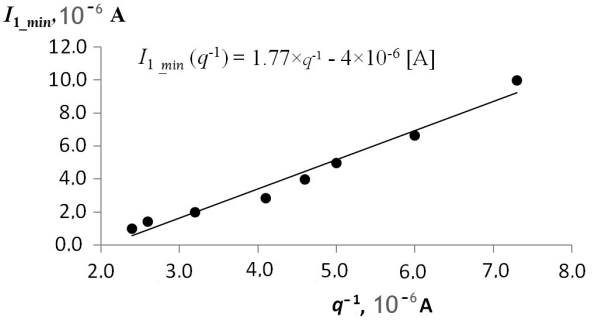

Рис. 2. Зависимость тока I_{1_min} от параметра q при $I_2 = I_{2_min}$, $I_3 = 100$ мкА

Из рисунков видно, что погрешность убывает при увеличении тока I_3 (рис. 3, в), в диапазоне токов от $0.2I_3$ до $0.8I_3$ погрешность слабо зависит от тока I_2 (рис. 3, б) и принимает минимум в окрестности тока $I_1 \approx q^{-1}$ (рис. 3, а).

Из результатов моделирования (см. табл.) также следует, что минимальная погрешность определения порогового тока уменьшается при увеличении параметра q аппроксимирующей функции. Зависимость $\delta_{min}(q)$, которая аппроксимируется степенной функцией с коэффициентом детерминации $R^2 = 0.99$, приведена на рис. 4.

Исследована зависимость погрешности определения порогового тока от уровня случайной составляющей сигнала фотоприемника. На рис. 5 приведена зависимость $\delta_{min}(S)$ при $q = 200\,000$ А$^{-1}$, $I_1 = 5.0 \times 10^{-6}$ А, $I_2 = 6.1 \times 10^{-5}$ А, $I_3 = 100 \times 10^{-6}$ А.

Видно, что погрешность возрастает прямо пропорционально при увеличении шума фотоприемного устройства.

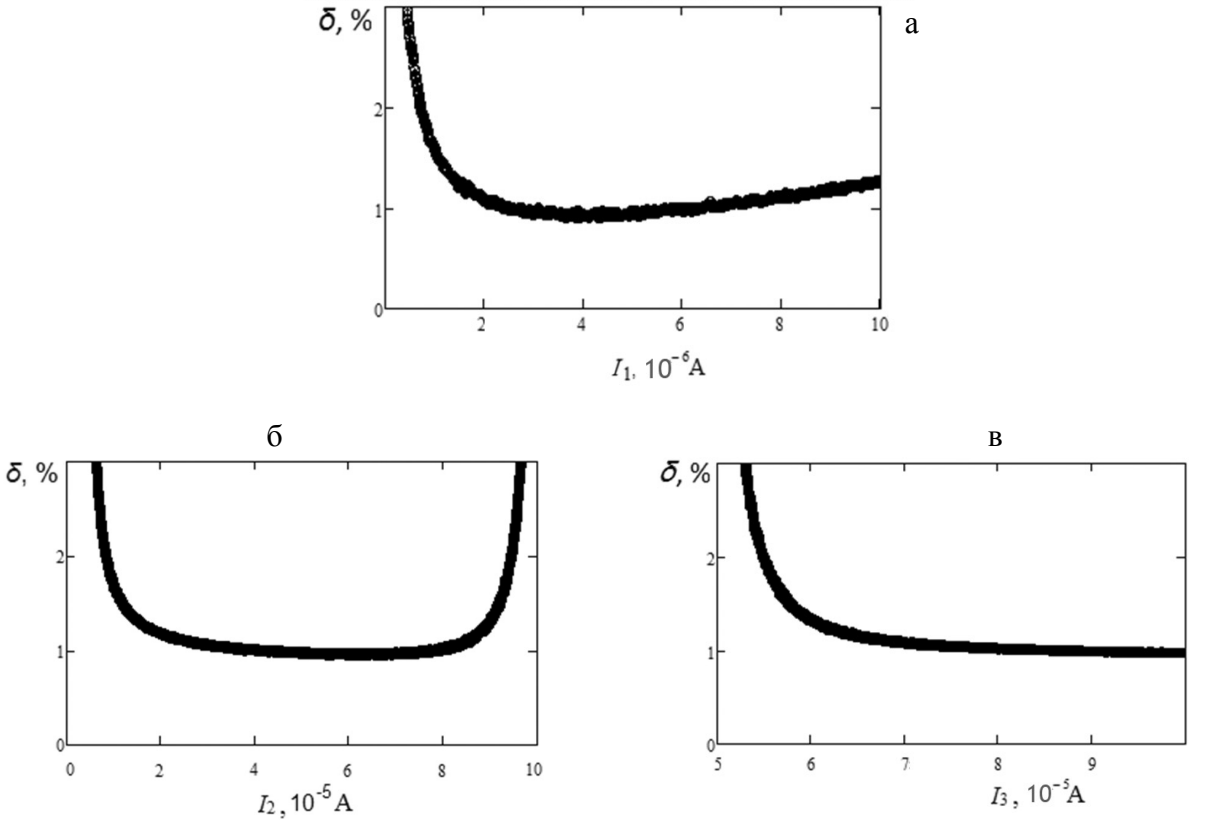

Рис. 3. Зависимости доверительной границы случайной погрешности определения порогового тока. а — от тока I_1 при $I_2 = 25$ мкА, $I_3 = 100$ мкА; б — от тока I_2 при $I_1 = 4$ мкА, $I_3 = 100$ мкА; в — от тока I_3 при $I_1 = 4$ мкА, $I_2 = 25$ мкА

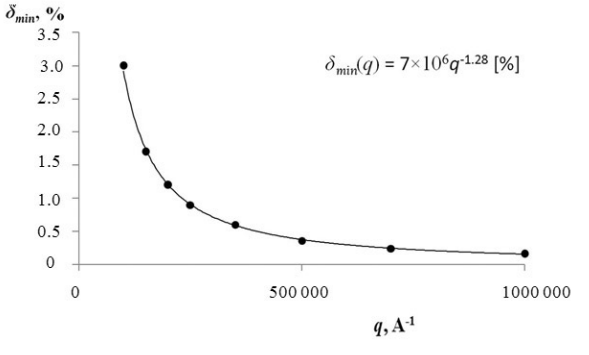

Рис. 4. Зависимость доверительной границы случайной погрешности определения порогового тока от параметра q аппроксимирующей функции, определяющего степень нелинейности ВтАХ, при $S = 10^{-10}$ Вт

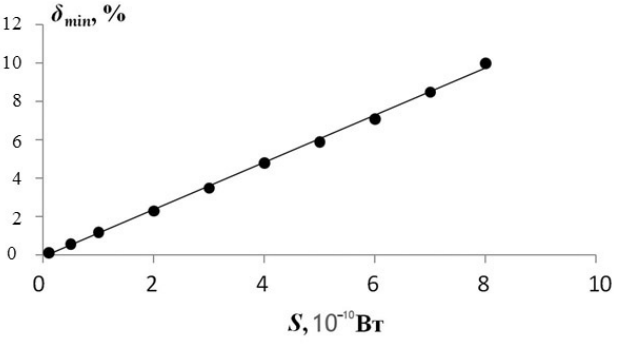

Рис. 5. Зависимость доверительной границы случайной погрешности определения порогового тока от СКО случайной составляющей сигнала фотоприемника

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проанализированы зависимости доверительной границы случайной погрешности определения порогового тока от выбора токов, степени нелинейности и случайной составляющей погрешности измерения ватт-амперной характеристики светодиода (кристалла светодиодной матрицы). Установлено, что погрешность определения порогового тока путем решения системы из трех урав-

нений, связывающих результат измерения мощности излучения светодиода и параметры ватт-амперной характеристики, существенно зависят от выбора токов, при которых измеряется мощность излучения. Показано, что минимизировать случайную погрешность определения порогового тока возможно путем выбора токов: I_1 — в окрестности значений $I_1 = q^{-1}$, где q — параметр аппроксимирующей ватт-амперную функцию характеристики; значение тока I_3 определяется приближением модели аппроксимирующей функции и составляет 20% значения тока I_{max}, при котором достигается максимум внешней квантовой эффективности светодиода, а ток I_2 выбирается равным половине тока I_3: $I_2 = I_3 / 2$. Значения токов I_1, I_2 и I_3 могут быть определены по результатам измерений и аппроксимации ВтАХ представительной выборки светодиодов.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (FFWZ-2025-0001).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Сушков В., Никифоров С.* Метод контроля потенциальной степени деградации характеристик светодиодов на основе твердых растворов AlGaInN // Полупроводниковая светотехника. 2011. № 3. URL: https://led-e.ru/svetodiod/metod-kontrolya/
2. *Богданов А.А.* Контроль параметров и качества светодиодов и изделий с ними при серийном производстве // Светотехника. 2015. № 1. С. 13–22. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=22961235
3. *Косарев В.А.* Анализ неисправностей и методов контроля светодиодов // Вестник УлГТУ. 2020. № 1. С. 30–35. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=44310371
4. *Фролов И.В., Сергеев В.А., Ходаков А.М., Зайцев С.А.* Исследование изменений характеристик светодиодных матриц бортового светильника при токовых испытаниях // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2021. № 8. DOI: 10.30898/1684-1719.2021.8.2
5. *Радаев О.А., Фролов И.В., Сергеев В.А., Зайцев С.А.* Сравнение эффективности отбраковки потенциально ненадежных светодиодов по пороговому току и прямому падению напряжения // Контроль. Диагностика. 2025. Т. 28, № 7. С. 61–66. DOI: 10.14489/td.2025.07.pp.061-066
6. *Сергеев В.А., Радаев О.А., Фролов И.В.* Измеритель внутренней квантовой эффективности светодиода // Приборы и техника эксперимента. 2023. № 6. С. 103–110. DOI: 10.31857/S0032816223060071
7. *Фролов И.В.* Измерение внутренней квантовой эффективности и крутизны ватт-амперной характеристики кристаллов светодиодной матрицы // Радиоэлектронная техника: межвузовский сборник научных трудов. Ульяновск: УлГТУ. 2024. С. 131–134. URL: https://lib.laop.ulstu.ru/venec/disk/2024/118.pdf

АО "Ульяновское конструкторское бюро приборостроения", Ульяновск, Россия (*Зайцев С.А.*)

Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Ульяновск, Россия (*Сергеев В.А., Фролов И.В., Радаев О.А., Казанков А.А.*)

Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия (*Фролов И.В.*)

Контакты: *Зайцев Сергей Александрович*, s.zaytsev@ukbp.ru

Материал поступил в редакцию 17.08.2026

NAUCHNOE PRIBOROSTROENIE, 2026, Vol. 36, No. 4, pp. 73–79 *ISSN 0868-5886*

ERRORS IN DETERMINING THE THRESHOLD CURRENT OF LEDS AND LED MATRIX CRYSTALS BASED ON WATT-AMP CHARACTERISTICS

S. A. Zaitsev[1], V. A. Sergeev[2], I. V. Frolov[2, 3], O.A. Radaev[2], A.A. Kazankov[2]

[1]*Ulyanovsk Instrument Design Bureau, Ulyanovsk, Russia*
[2]*Ulyanovsk Branch of the V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, Ulyanovsk, Russia*
[3]*Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia*

Random errors in determining the threshold current of LEDs and LED matrix crystals based on radiated power measurements with three currents were analyzed using computer modeling. It is shown that the random component of the threshold current determination error, arising from the random error in measuring the LED radiated power using the photodetector, significantly depends on the current values at which the measurements are performed. There is a combination (set) of currents at which the random error in determining the threshold current is minimal: current I_1 should be selected in the vicinity of q^{-1}, where q is the parameter of the approximating function determining the degree of nonlinearity of the watt-ampere characteristic (WAC); current I_3 is determined by an approximation of the approximating function model and is equal to 20% of the current I_{max}, at which the maximum external quantum efficiency of the LED is achieved; and current I_2 is selected equal to half the current I_3. The values of currents I_1, I_2, and I_3 can be determined from the results of WAC measurements on a representative sample of LEDs.

Keywords: threshold current, LED, LED matrix, measurements, random error

REFERENCES

1. Sushkov V., Nikiforov S. [A Method for Monitoring the Potential Degree of Degradation in the Characteristics of Solid-Solution-Based LEDs AlGaInN]. *Poluprovodnikovaya svetotekhnika* [Semiconductor Lighting Technology], 2011, no. 3, pp. 10–13. (In Russ.). URL: https://led-e.ru/svetodiod/metod-kontrolya/
2. Bogdanov A.A. [Monitoring the Parameters and Quality of LEDs and Products Containing Them in Mass Production]. *Svetotekhnika* [Lighting Technology], 2015, no. 1, pp. 13–22. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=22961235 (In Russ.).
3. Kosarev V.A. [Failure analysis and control methods for LEDs]. *Vestnik UlGTU* [Bulletin of Ulyanovsk State Technical University], 2020, no. 1, pp. 30–35. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=44310371 (In Russ.).
4. Frolov I.V., Sergeev V.A., Hodakov A.M., Zaitsev S.A. [Investigation of changes in the characteristics of led matrices of the on-board luminaire during tests in the electrocycling mode]. *Zhurnal Radioelektroniki* [Journal of Radio Electronics], 2021, no. 8. DOI: 10.30898/1684-1719.2021.8.2 (In Russ.).
5. Radaev O.A., Frolov I.V., Sergeev V.A., Zaitsev S.A. [Comparison of led rejection methods by threshold current and voltage drop]. *Kontrol'. Diagnostika* [Testing. Diagnostics], 2025, vol. 28, no. 7, pp. 61–66. DOI: 10.14489/td.2025.07.pp.061-066 (In Russ.).
6. Sergeev V.A., Radaev O.A., Frolov I.V. [LED Internal Quantum Efficiency Meter]. *Pribory i tekhnika ehksperimenta* [Instruments and Experimental Techniques], 2023, no. 6, pp. 103–110. (In Russ.). DOI: 10.31857/S0032816223060071
7. Frolov I.V. [Measurement of internal quantum efficiency and steepness of watt-ampere characteristics of LED matrix chips]. *Radioehlektronnaya tekhnika: mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov* [Proc. An Interuniversity Collection of Scientific Papers:"Radio Electronics"], Ulyanovsk, Ulyanovsk State Technical University, 2024, pp. 131–134. (In Russ.). URL: https://lib.laop.ulstu.ru/venec/disk/2024/118.pdf

Contacts: *Zaitsev Sergey Aleksandrovich,*
s.zaytsev@ukbp.ru

The article was received by the editorial office on 17.08.2026

INTRODUCTION

LEDs and LED arrays (LA) are currently widely used in lighting systems, architectural lighting systems, on-board lighting equipment, automotive optics, medical equipment, and other industries. The quality and reliability of lighting equipment are largely determined by the quality of the LEDs and LAs. Quality control methods used in the production of lighting equipment [1–3] are based on measuring the integral parameters and characteristics of the LAs: current-voltage characteristics, luminous flux, color temperature, etc. The parameters of individual crystals are not monitored, although the failure of a single crystal within the LA or a significant deviation of its parameters from the average value leads not only to a loss of efficiency but also to the failure of the entire LA. To improve the efficiency of LA quality control, methods are being developed to monitor the parameters of the matrix crystals. One of the parameters that allows one to monitor the quality of individual crystals within an LED array is the threshold current [4]. The threshold current is the minimum current at which the LED emits radiation [5] demonstrated that rejection of LEDs prone to accelerated degradation by the threshold current is more effective than rejection by the forward voltage drop.

In [4, 5], the threshold current is determined by measuring the watt-ampere characteristic (WAC) $P(I)$ of an LED or LA crystal in the microcurrent range, approximating the measurement results, and defining the threshold current I_{th} as the current at which the approximating function takes on a zero value. When measuring the WAC of an LED or LA crystal, a random error in the radiated power measurement occurs due to the influence of noise in the photodetector. Consequently, the random component of the threshold current determination error depends on the error in radiant power measurement. Improving the accuracy of LED threshold current determination is possible by selecting currents for radiant power measurements and subsequent threshold current calculations that minimize the influence of the random component of radiant power measurement error on the threshold current determination error.

The aim of the work was to analyze, using computer modeling, the dependence of the random error in determining the threshold current of an LED or LA crystal on the level of the random component of the photodetector signal and on the value of the currents at which the radiation power is measured, as well as to determine the values of the currents at which the error in determining the threshold current takes on a minimum value.

DESCRIPTION OF THE COMPUTER SIMULATION METHODOLOGY

Initial equation for simulation

To estimate the random component of the error in determining the LED threshold current using computer simulation, the function described in detail in [6] was used:

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

where I_{th} is the threshold current, and the parameters m and q of function (1) are determined by the parameters of the LED heterostructure by the expressions:

$$m = \eta_{extr} V \frac{hc}{\lambda} \frac{A^2}{2B}, \qquad (2)$$

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

in which η_{extr} is the optical extraction efficiency, V is the volume of the active region of the heterostructure, h is Planck's constant, c is the speed of light, λ is the emission wavelength, η_{inj} is the coefficient of injection of charge carriers into the active region, and e is the elementary charge. A, B, and C are the coefficients of nonradiative recombination via the Shockley – Read – Hall mechanism, radiative recombination, and nonradiative Auger recombination, respectively.

The parameter q of function (1) determines the degree of nonlinearity of the WAC: as q increases, the function approaches a linear dependence.

Function (1) is derived from the generally accepted ABC model of charge carrier recombination in light-emitting heterostructures, assuming a small Auger recombination component in the microcurrent range. This function satisfactorily approximates the WAC of an LED or LA crystal in the current range $I < 0.2I_{max}$, where I_{max} is the current at which the LED achieves its maximum quantum efficiency.

Determining the threshold current

To determine the threshold current I_{th}, it is sufficient to compose and solve a system of equations for three currents I_1, I_2 and I_3:

$$\begin{cases} P_1 = \frac{m}{2}\left(\sqrt{1 + 2q(I_1 - I_{th})} - 1\right)^2, \\ P_2 = \frac{m}{2}\left(\sqrt{1 + 2q(I_2 - I_{th})} - 1\right)^2, \\ P_3 = \frac{m}{2}\left(\sqrt{1 + 2q(I_3 - I_{th})} - 1\right)^2. \end{cases} \qquad (4)$$

By dividing the first and second equations by the third, we transform system of equations (4):

$$\begin{cases} a = \dfrac{\sqrt{1+2q(I_1 - I_{\text{th}})}-1}{\sqrt{1+2q(I_3 - I_{\text{th}})}-1}, \\ b = \dfrac{\sqrt{1+2q(I_2 - I_{\text{th}})}-1}{\sqrt{1+2q(I_3 - I_{\text{th}})}-1}, \end{cases} \quad (5)$$

where $a = \sqrt{P_1 / P_3}$, $b = \sqrt{P_2 / P_3}$.

We express q from the first and second equations of system (5)

$$\begin{cases} q = 2a(1-a)\dfrac{a(I_3 - I_{\text{th}}) + I_{\text{th}} - I_1}{\left(a^2(I_3 - I_{\text{th}}) + I_{\text{th}} - I_1\right)^2}, \\ q = 2b(1-b)\dfrac{b(I_3 - I_{\text{th}}) + I_{\text{th}} - I_2}{\left(b^2(I_3 - I_{\text{th}}) + I_{\text{th}} - I_2\right)^2} \end{cases} \quad (6)$$

and equate the right-hand sides of the equations of system (6):

$$a(1-a)\frac{a(I_3 - I_{\text{th}}) + I_{\text{th}} - I_1}{\left(a^2(I_3 - I_{\text{th}}) + I_{\text{th}} - I_1\right)^2} = b(1-b)\frac{b(I_3 - I_{\text{th}}) + I_{\text{th}} - I_2}{\left(b^2(I_3 - I_{\text{th}}) + I_{\text{th}} - I_2\right)^2}. \quad (7)$$

The threshold current value I_{th} is determined by solving nonlinear equation (7) numerically. In the simulation, equation (7) was solved by dividing the segment in half.

Algorithm for estimating the random component of the error

The random component of the error in determining the threshold current was estimated using computer modeling in MathCAD and the following algorithm:

1) the watt-ampere characteristic of an LED was modeled: the numerical values of the parameters *m, q*, and I_{th} were specified, and using expression (1), we generated an array of LED radiant power values $P_i = P(I_i)$ in the current range $I_i = I_{\text{th}} \ldots I_{\text{SP}}$ with a step of 1 nA, where I_{SP} is the upper (limit) current value of the simulated WAC;

2) an ensemble of N watt-ampere characteristic realizations distorted by random measurement error was formed; the random measurement error of the LED radiated power by the photodetector was modeled by summing the LED radiated power values P_i at each i-th point with a random variable Δ_i, having a normal distribution law, zero mean, and standard deviation S, specified from the range $S = 10^{-11} \ldots 10^{-9}$ W; an example of the WAC and realizations of the WAC with random measurement error are shown as an illustration in Fig. 1;

Fig. 1. Model of the watt-ampere characteristic without a random component of measurement error (a) and with a random component of measurement error at $S = 10^{-10}$ W (б)

3) the current values $I_3 = I_{\text{SP}}$, $I_2 = I_{\text{SP}} / 2$ were set; an external cycle was started, in which the current values I_1 from the range $I_1 = I_{\text{th}} \ldots I_2$ were alternately set;

4) an inner cycle was launched, in which the threshold current I_{th_j} was calculated for each j-th ($j = 1, \ldots, N$) realization of the WAC ensemble;

5) upon completion of the inner cycle, the standard deviation of the threshold current determination result was calculated

$$S_0 = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{N}\left(I_{\text{th}_j} - I_{\text{th}}\right)^2}{N(N-1)}} \quad (8)$$

and the confidence limit of the random error in determining the threshold current in absolute

$$\varepsilon = \pm S_0 t_{p,N-1} \quad (9)$$

and relative forms

$$\delta = \frac{\varepsilon}{I_{\text{th}}} 100\%, \quad (10)$$

where $t_{p,N\text{-}1}$ is the Student's coefficient at a confidence probability of $p = 0.95$;

6) the current $I_{1_\min}$, at which the random error takes on a minimum value, was determined from the dependence $\delta(I_1)$;

7) the current values $I_1 = I_{1_\min}$, $I_3 = I_{\text{SP}}$ were set; an outer cycle was launched, in which the current I_2 values from the range $I_2 = I_{1_\min} \ldots I_3$ were sequentially set;

8) the procedures in points 4 and 5 were repeated, and the current $I_{2_\min}$ at which the random error takes on a minimum value was determined using the $\delta(I_2)$ dependence;

9) the current values $I_1 = I_{1_\min}$, $I_2 = I_{2_\min}$ were set; an external cycle was started, in which the current I_3 values were successively set from the range $I_3 = I_{2_\min} \ldots I_{\text{SP}}$;

10) the procedures in points 4 and 5 were repeated, and the current I_{3_min} at which the random error takes on a minimum value δ_{min} was determined using the $\delta(I_3)$ dependence;

11) the procedures in points 2–10 were repeated l times until the relative difference in the values of currents I_{1_min}, I_{2_min} and I_{3_min} between the k-th and $(k-1)$-th iterations ($k = 1,\ldots, l$) becomes less than 1%.

SIMULATION RESULTS

Random errors in threshold current determination were simulated by solving a system of equations constructed for three values of the watt-ampere characteristic of an LED (or LA crystal) using the presented algorithm. The values of parameters m, q, and I_{th} were set based on a priori information about the parameters of the approximating function, previously obtained for Osram Duris S8 LED arrays [7], from the range of values: $m = 10^{-6}$ W, $q = 10^5 \ldots 10^6$ A^{-1}, $I_{th} = 1 \ldots 100$ nA. The I_{SP} current was set equal to $I_{SP} = 100$ μA, it ensures that the condition $I_{SP} < 0.2I_{max}$ is met for LA of this type.

The dependences of the confidence limit of the random error in threshold current determination on currents I_1, I_2, and I_3 were studied. The measurement error of the WAC was modeled by a random variable with a standard deviation of $S = 10^{-10}$ W. The threshold current was set to $I_{th} = 25$ nA. The table shows the modeling results.

Tab. Parameters determined at $S = 10^{-10}$ W, $I_{th} = 25$ nA

The results in the table show that with an increase in the q parameter (with a decrease in WAC nonlinearity), the I_{1_min} current decreases, while the I_{2_min} and I_{3_min} currents change little when q changes.

Figure 2 shows a graph of the $I_{1_min}(q^{-1})$ dependence, which is satisfactorily approximated (determination coefficient $R^2 = 0.97$) by a linear function. At $q = 200\,000$ A^{-1}, $I_{1_min} = q^{-1}$.

Fig. 2. Dependence of current I_{1_min} on parameter q at $I_2 = I_{2_min}$, $I_3 = 100$ μA

Figure 3 shows the dependences of the confidence limit of the random error in determining the threshold current on currents I_1, I_2 and I_3 at $q = 2.5 \cdot 10^5$ A^{-1}.

Fig. 3. Dependences of the confidence limit of the random error in determining the threshold current. а — on current I_1 at $I_2 = 25$ μA, $I_3 = 100$ μA; б — on current I_2 at $I_1 = 4$ μA, $I_3 = 100$ μA; в — on current I_3 at $I_1 = 4$ μA, $I_2 = 25$ μA

The figures show that the error decreases with increasing current I_3 (Fig. 3, в); in the current range from $0.2I_3$ to $0.8I_3$, the error depends weakly on current I_2 (Fig. 3, б) and reaches a minimum near current $I_1 \approx q^{-1}$ (Fig. 3, а).

The simulation results (see table) also show that when the minimum error in determining the threshold current decreases, parameter q of the approximating function increases.

The dependence $\delta_{min}(q)$, which is approximated by a power function with a determination coefficient $R^2 = 0.99$, is shown in Fig. 4.

Fig. 4. Dependence of the confidence limit of the random error in determining the threshold current on the parameter q of the approximating function, the parameter determines the degree of nonlinearity of the WAC, at $S = 10^{-10}$ W

The dependence of the threshold current determination error on the level of the random component of the photodetector signal was investigated. Figure 5 shows the $\delta_{min}(S)$ dependence for $q = 200\,000$ A^{-1}, $I_1 = 5.0 \times 10^{-6}$ A, $I_2 = 6.1 \times 10^{-5}$ A, $I_3 = 100 \times 10^{-6}$ A.. It is evident that the error increases directly proportionally with increasing photodetector noise.

Fig. 5. Dependence of the confidence limit of the random error in determining the threshold current on the standard deviation of the random component of the photodetector signal

CONCLUSION

This paper analyzes the dependence of the confidence limit of the random error in determining the

threshold current on the choice of currents, the degree of nonlinearity, and the random component of the error in measuring the watt-ampere characteristic of an LED (LA crystal). It is established that the error in determining the threshold current by solving a system of three equations relating the LED radiant power measurement result and the watt-ampere characteristic parameters depends significantly on the choice of currents at which the radiant power is measured. It is shown that it is possible to minimize the random error in determining the threshold current by choosing currents: I_1 — in the vicinity of values $I_1 = q^{-1}$, where q is the parameter of the characteristic approximating the watt-ampere function; The value of current I_3 is determined by the approximation of the approximating function model and is equal to 20% of the current I_{max}, at which the maximum external quantum efficiency of the LED is achieved, and current I_2 is selected equal to half the current I_3: $I_2 = I_3 / 2$. The values of currents I_1, I_2, and I_3 can be determined based on the results of measurements and approximation of the WAC of a representative sample of LEDs.