

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.11.6>

УДК: 621.382

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СВЕТОДИОДНЫХ СОВ МАТРИЦ ПО ПОРОГОВОМУ ТОКУ

В.А. Сергеев^{1,2}, И.В. Фролов¹, С.А. Зайцев³, О.А. Радаев¹

¹ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Ульяновский филиал
432071, г. Ульяновск, ул. Гончарова, д. 48/2

² Ульяновский государственный технический университет
432027, г. Ульяновск, ул. Северный венец, д. 32

³ АО «Ульяновское конструкторское бюро приборостроения»
432071, г. Ульяновск, ул. Крымова, д. 10А

Статья поступила в редакцию 23 августа 2023 г.

Аннотация. Представлено описание способа измерений порогового тока – минимального тока, при котором возникает оптическое излучение, – отдельных кристаллов, входящих в состав светодиодных СОВ (chip on board) матриц. Способ состоит в регистрации цифровой камерой средних значений интенсивности излучения кристаллов при трех малых значениях электрического тока и определении пороговых токов путем решения системы уравнений, связывающей измеренные значения интенсивности с функцией, аппроксимирующей ватт-амперную характеристику в диапазоне малых токов. Способ измерений апробирован на коммерчески доступных светодиодных СОВ матрицах, состоящих из десяти последовательно соединенных кристаллов. Определено, что значения порогового тока кристаллов различаются: для исследованных образцов коэффициент вариации составил от 2,6 % до 39,2 %. В результате проведенных испытаний СОВ матриц под действием тока 140 мА при максимально допустимой температуре окружающей среды 110 °С в течение 11 суток установлено, что изменения средних значений пороговых токов при испытаниях коррелируют с изменениями вольт-амперных характеристик

матриц, измеренных в диапазоне напряжений от 17 до 24 В, при которых доминирует ток утечки: пороговый ток увеличивается у тех матриц, у которых увеличивается ток утечки. Коэффициент корреляции между относительными изменениями тока утечки и средних значений пороговых токов составляет 0,94. Показано, что коэффициент корреляции между величиной спада светового потока матриц при испытаниях и изменением среднего значения порогового тока составляет 0,96. Установленные сильные корреляционные связи показывают возможность диагностики качества по пороговому току отдельных кристаллов в составе светодиодных COB матриц.

Ключевые слова: светодиодные COB матрицы, пороговый ток, измерения, испытания.

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Автор для переписки: Фролов Илья Владимирович, ilya-frolov88@mail.ru

Введение

Светодиодные COB (chip on board) матрицы в настоящее время активно используются в различных светодиодных устройствах, в первую очередь, в устройствах освещения. В таких матрицах светодиодные кристаллы (чипы) монтируют на плату, изготовленную из материалов с высокой теплопроводностью на металлической основе, и покрывают слоем люминофора. Количество кристаллов в составе матриц может составлять от единиц до нескольких десятков, а потребляемая мощность может достигать 200 Вт и более. COB матрицы характеризуются большой светоизлучающей поверхностью, создающей однородный световой поток высокой плотности, что невозможно достичь на дискретных светодиодах высокой мощности [1, 2].

Кристаллы COB матриц, как правило, изготавливают на основе светоизлучающих гетероструктур с InGaN/GaN множественными квантовыми ямами. Стабильность характеристик COB матриц в процессе эксплуатации во многом определяется качеством кристаллов, входящих в ее состав. Контроль и

отбраковка по интегральным параметрам, таким как падение напряжения при заданном токе, световой поток, цветовая температура, тепловое сопротивление не всегда позволяют выявлять объекты со скрытыми структурными дефектами, которые не влияют на основные характеристики изделия в момент оценки его соответствия техническим условиям, но в дальнейшем, в ходе эксплуатации, могут являться активными центрами, резко ухудшающими деградационные процессы. В настоящей работе показана возможность оценки качества СОВ матриц и отдельных ее кристаллов по электрооптическим характеристикам, измеренным в диапазоне малых токов, при которых возникает свечение структуры.

1. Методика определения порогового тока светодиода

Пороговый ток – минимальный ток, при котором возникает излучение, – характеризует потери на безызлучательную рекомбинацию в системе дефектов, потери носителей заряда при туннелировании через потенциальный барьер и их утечку из активной области в барьерные слои [3]. В [4] показано, что значения порогового тока коррелируют со значениями тока, при котором наблюдается максимум токовой зависимости внешней квантовой эффективности светодиода, а при испытаниях в режиме постоянного тока светодиоды с большими значениями порогового тока деградируют быстрее, чем светодиоды с малыми значениями порогового тока.

Согласно АВС модели рекомбинации носителя заряда в гетероструктуре полный ток I светодиода может быть определен выражением [5-7]:

$$I = \frac{eV}{\eta_{inj}} (An + Bn^2 + Cn^3) + f(n), \quad (1)$$

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 Шокли-Рида-Холла, излучательной рекомбинации и безызлучательной Оже-рекомбинации соответственно; n – концентрация носителей заряда; $f(n)$ – функция,

определяющая утечку носителей заряда из активной области в барьерные слои гетероструктуры.

Функция $f(n)$ зависит от механизма утечки и становится значительной при высоких концентрациях носителей заряда. При малых n , существенно меньших концентрации, при которой достигается максимум квантовой эффективности, ток утечки носителей заряда составляет доли процента от полного тока светодиода [7]. При устремлении концентрации носителей заряда к нулю $n \rightarrow 0$ слагаемое $f(n)$ приобретает смысл порогового тока I_{th} – минимального тока, при котором возникает излучение структуры: $f(n) \rightarrow I_{th}$. При малых токах влиянием Оже-рекомбинации можно пренебречь [8]. В этом случае выражение (1) может быть представлено в виде

$$I \approx \frac{eV}{\eta_{inj}} (An + Bn^2) + I_{th}. \quad (2)$$

Мощность излучения, выходящего за пределы светодиода, определяется выражением

$$P(n) = \eta_{extr} V \frac{hc}{\lambda} Bn^2, \quad (3)$$

где η_{extr} – коэффициент вывода излучения; h – постоянная Планка; c – скорость света; λ – длина волны излучения [9].

Выражая концентрацию носителей заряда из (2) и подставляя в (3), получаем функцию, аппроксимирующую ватт-амперную характеристику светодиода в окрестности порогового тока [10]:

$$P(I) = \frac{m}{2} \left(\sqrt{1 + 2q(I - I_{th})} - 1 \right)^2, \quad (4)$$

где m – коэффициент, определяющий уровень оптической мощности; q – параметр, определяющий кривизну характеристики $P(I)$.

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

$$E(I) = SP(I), \quad (5)$$

где S – коэффициент, имеющий размерность [В/Вт] и значение которого определяется чувствительностью фотоприемника, коэффициентом усиления, диаграммами направленности светодиода и фотодиода.

Таким образом, чтобы определить пороговый ток I_{th} светодиода, необходимо измерить выходные сигналы фотоприемника $E(I_1)$, $E(I_2)$ и $E(I_3)$ при токах I_1 , I_2 и I_3 соответственно и решить систему уравнений, связывающих эти значения:

$$\begin{cases} E(I_1) = \frac{m}{2S} \left(\sqrt{1 + 2q(I_1 - I_{th})} - 1 \right)^2, \\ E(I_2) = \frac{m}{2S} \left(\sqrt{1 + 2q(I_2 - I_{th})} - 1 \right)^2, \\ E(I_3) = \frac{m}{2S} \left(\sqrt{1 + 2q(I_3 - I_{th})} - 1 \right)^2. \end{cases} \quad (6)$$

Выбор токов I_1 , I_2 и I_3 определяется из условия минимизации систематических и случайных погрешностей измерения мощности излучения. Ток I_1 задается наименьшим, при котором обеспечивается приемлемый уровень погрешности, возникающей из-за влияния шума фотоприемника на результат измерения оптического сигнала малого уровня. Ток I_3 должен быть примерно в 5 раз меньше, чем ток I_{max} , при котором достигается максимум квантовой эффективности. В этом случае, как показано в работе [11], составляющая погрешности, обусловленная приближением АВС модели, не превышает 1%. Ток I_2 выбирается из условия $I_2 \approx 0,5I_3$. При этом минимизируется случайная погрешность, вызванная влиянием флуктуаций сигнала фотоприемника на результаты измерений мощностей излучения светодиода [12].

2. Методика определения порогового тока кристаллов светодиодной СОВ матрицы

В качестве объекта исследований использовались светодиодные матрицы типа GW P9LT31.EM DURIS S 8 Osram. Матрицы этого типа состоят из десяти последовательно соединенных кристаллов (рис. 1). Рабочее напряжение составляет 32 В, максимально допустимый постоянный ток – 200 мА.

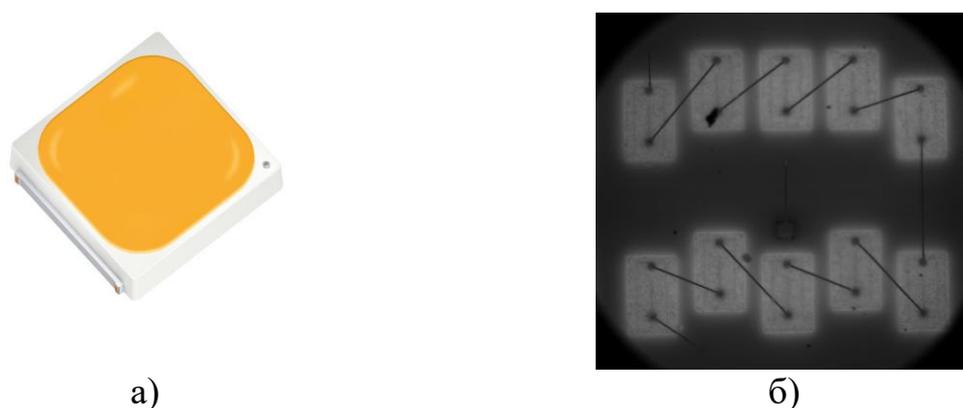


Рис. 1. Внешний вид (а) и структура (б) светодиодных COB матриц GW P9LT31.EM DURIS S 8.

Измерения пороговых токов I_{th} кристаллов COB матриц проводились при комнатной температуре на аппаратно-программном комплексе [13], состоящем из микроскопа Levenhuk D320L, монохромной цифровой КМОП камеры FL-20BW, компьютера, лабораторного источника питания, прецизионного мультиметра Tektronix DMM4040, используемого в качестве амперметра. Спектральный диапазон чувствительности камеры FL-20BW составляет 300 – 1100 нм, максимум чувствительности достигается на длине волны излучения 495 нм. Исследуемая COB матрица располагалась на предметном столике микроскопа. Через матрицу поочередно пропускали постоянные токи $I_1 = 70$ нА, $I_2 = 2,5$ мкА и $I_3 = 5$ мкА и регистрировали ее изображения. При измерениях время экспозиции устанавливалось равным $t_1 = 300$ с при токе I_1 , $t_2 = 400$ мс при токе I_2 и $t_3 = 200$ мс при токе I_3 . Три монохромных изображения в формате .tiff с разрешением 5472×3648 пикселей и разрядностью 16 бит, полученные камерой, сохранялись в памяти компьютера. Затем на изображениях выделялись j -е области ($j = 1 \dots 10$), соответствующие кристаллам матрицы, в пределах каждой области изображения рассчитывались средние значения яркости пикселей \overline{L}_j , затем рассчитывалась средняя интенсивность излучения j -го кристалла матрицы (в относительных единицах) по формуле

$$E_j(I_n) = \frac{\overline{L}_j}{t_n}, \quad (7)$$

где t_n – время экспозиции камеры при токе I_n , $n = 1, 2, 3$.

Пороговый ток кристаллов матрицы I_{th_j} рассчитывался путем решения системы уравнений (6), составленной на основе результатов определения интенсивностей излучения j -го кристалла при токах I_1, I_2 и I_3 соответственно.

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

Испытания матриц проводились под действием постоянного тока 140 мА при максимально допустимой температуре окружающей среды для матриц этого типа 110 °С в течение 11 суток. При испытаниях контролировались пороговые токи кристаллов, вольт-амперные характеристики матриц в диапазоне напряжений от 17 до 32 В и диапазоне токов от 1 нА до 200 мА, а также световой поток матриц. Напряжение на матрице измеряли прецизионным мультиметром Tektronix DMM4040, ток – мультиметром Keythley DMM6500, световой поток – люксметром ТКА-Люкс с фотометрической сферой при токе 150 мА.

Результаты измерений пороговых токов кристаллов матриц показали, что их значения существенно различаются. В таблице 1 приведены оценки средних значений \bar{I}_{th} , средних квадратических отклонений (СКО) σ_{th} , коэффициентов вариации $v = (\sigma_{th} / \bar{I}_{th}) \times 100\%$ и изменений среднего значения $\Delta \bar{I}_{th}$ порогового тока кристаллов пяти СОВ матриц до и после испытаний.

Таблица 1. Оценки выборочных значений пороговых токов кристаллов светодиодных СОВ матриц

№ матрицы	D1		D2		D5		D6		D14	
	До испытаний	После испытаний								
\bar{I}_{th} , нА	12	25	42	24	38	15	73	76	24	35
σ_{th} , нА	4,8	12,8	1,1	5,6	2,2	5,9	9,4	8,4	1,4	7,0
v , %	39,2	51,8	2,6	23	5,8	39,5	12,9	11,0	5,8	19,9
$\Delta \bar{I}_{th}$, %	108		-43		-61		4		46	

Матрица D14 характеризуется наименьшим средним значением порогового тока кристаллов, а матрица D6 – наибольшим. Наименьшее значение коэффициента вариации у матрицы D2, наибольшее – у матрицы D6.

В процессе испытаний среднее значение порогового тока матриц изменилось: у матриц D1, D6 и D14 увеличилось, а у матриц D2 и D5 – уменьшилось.

Вольт-амперные характеристики матриц также изменились, причем наиболее существенные изменения произошли в диапазоне напряжений от 17 до 24 В, при которых доминирует ток утечки (рис. 2).

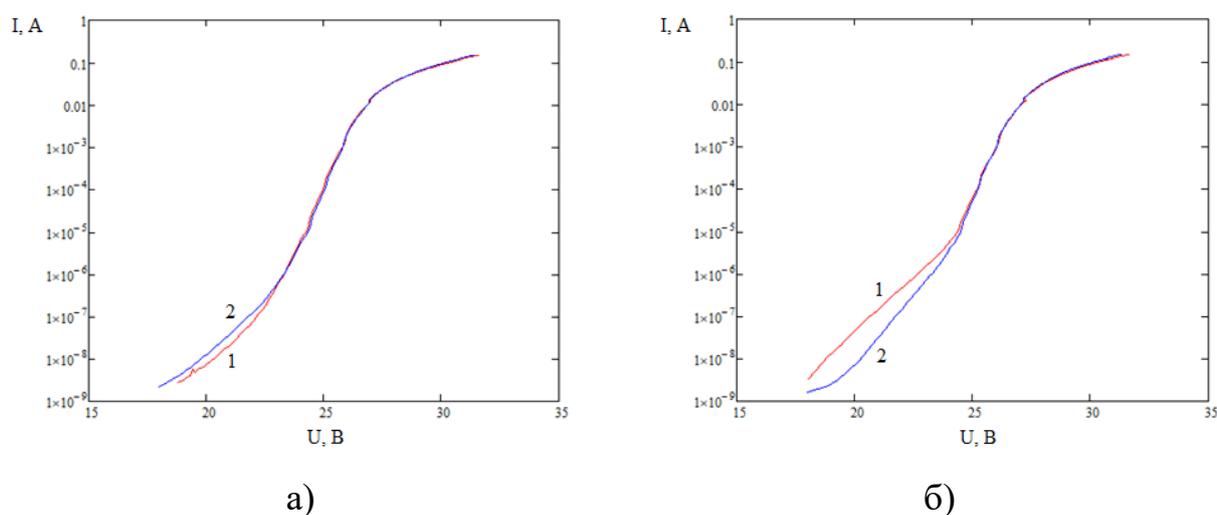


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики светодиодных COB матриц D1 (а) и D2 (б): 1 – до испытаний; 2 – после испытаний.

В табл. 2 приведены значения прямого тока при напряжении на матрицах 20 В до и после испытаний. После испытаний у матриц D1, D6 и D14 произошло увеличение тока утечки, а у матриц D2 и D5 – уменьшение. Наибольшие изменения произошли у матриц D1 и D14, наименьшие – у матрицы D6.

Таблица 2. Значения прямого тока матриц при напряжении 20 В

№ матрицы	I, нА				
	D1	D2	D5	D6	D14
До испытаний	7,6	45,9	19,6	19,1	9,9
После испытаний	18,9	10,0	7,3	25,7	24,7
Относительное изменение, %	149	-78	-63	35	149

Коэффициент корреляции между относительными изменениями начального участка вольт-амперных характеристик (табл. 1) и средних значений пороговых токов матриц (табл. 2) составляет 0,94, что указывает на сильную корреляционную связь между этими величинами.

В процессе испытаний у всех исследованных матриц произошло уменьшение светового потока (табл. 3), причем у тех матриц, у которых пороговый ток вырос, спад светового потока больше, чем у тех матриц, у которых пороговый ток уменьшился. Коэффициент корреляции между значениями $\Delta\Phi$ и $\Delta\bar{I}_{th}$ составляет 0,96.

Таблица 3. Изменение параметров матриц при испытаниях

№ матрицы	Изменение порогового тока $\Delta\bar{I}_{th}, \%$	Спад светового потока $\Delta\Phi, \%$
D1	108	19
D2	-43	8
D5	-61	10
D6	4	12
D14	46	16

Установленные корреляционные связи показывают возможность диагностики качества по пороговому току отдельных кристаллов в составе светодиодных COB матриц.

Заключение

В работе представлено описание способа измерений порогового тока отдельных кристаллов, входящих в состав светодиодных COB матриц. Способ измерений апробирован на коммерчески доступных светодиодных матрицах типа GW P9LT31.EM DURIS S 8 Osram, состоящих из десяти последовательно соединенных кристаллов. Определено, что значения порогового тока кристаллов различаются: для исследованных образцов коэффициент вариации принимает значения от 2,6 % до 39,2 %. В результате проведенных испытаний COB матриц под действием тока 140 мА при максимально допустимой температуре

окружающей среды 110 °С в течение 11 суток установлено, что уменьшение тока утечки сопровождается уменьшением порогового тока, а увеличение – возрастанием; у матриц, у которых среднее значение порогового тока уменьшилось, спад светового потока меньше, чем у матриц, у которых среднее значение порогового тока увеличилось. Установленные корреляционные связи показывают возможность диагностики качества по пороговому току отдельных кристаллов в составе светодиодных COB матриц.

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Литература

1. Виноградова К. Передовые светодиодные продукты от Samsung Electronics: мощные светодиодные сборки chip-on-board серий В, С и D // Полупроводниковая светотехника. – 2016. – Т. 6. – №. 44. – С. 28-34.
2. Феопёнтов А. Модули Chip-On-Board Часть 1. Технология, конструкция, применение // Полупроводниковая светотехника. – 2012. – Т. 2. – №. 16. – С. 26-28.
3. Averkiev N. S. et al. Features of the recombination processes in InGaN/GaN based LEDs at high densities of injection current // Technical Physics Letters. – 2009. – V. 35. – P. 922-924. <https://doi.org/10.1134/S1063785009100149>
4. Сергеев В.А., Фролов И.В., Радаев О.А. Исследование связи степени дефектности светоизлучающих наногетероструктур зеленых InGaN/GaN-светодиодов с величиной порогового тока // Письма в журнал технической физики. – 2017. – Т. 43. – №. 4. – С. 89-93. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2017.04.44302.16344>
5. Meuyaard D.S. et al. Efficiency droop in gallium indium nitride (GaInN)/gallium nitride (GaN) LEDs // Nitride Semiconductor Light-Emitting Diodes (LEDs). – Woodhead Publishing, 2014. – P. 279-300. <https://doi.org/10.1533/9780857099303.2.279>

6. Cho J., Schubert E.F., Kim J.K. Efficiency droop in light-emitting diodes: Challenges and countermeasures // *Laser & Photonics Reviews*. – 2013. – V. 7. – №. 3. – P. 408-421. <https://doi.org/10.1002/lpor.201200025>
7. Onwukaeme C., Lee B., Ryu H.Y. Temperature dependence of electron leakage current in InGaN blue light-emitting diode structures // *Nanomaterials*. – 2022. – V. 12. – №. 14. – P. 2405. <https://doi.org/10.3390/nano12142405>
8. Shim J. I., Shin D. S. Measuring the internal quantum efficiency of light-emitting diodes: Towards accurate and reliable room-temperature characterization // *Nanophotonics*. – 2018. – V. 7. – №. 10. – P. 1601-1615. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2018-0094>
9. Schubert E. F. *Light Emitting Diodes*. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
10. Фролов И.В., Сергеев В.А. Диагностический контроль качества светодиодов по локальным параметрам электролюминесценции и фототока. Монография. – М.: СОЛОН-Пресс, 2023. – 160 с.
11. Радаев О. А., Фролов И. В., Сергеев В. А. Аппаратно-программный комплекс для измерения внутренней квантовой эффективности InGaN/GaN светодиодов // *Радиоэлектронная техника: межвузов. сб. науч. тр.* – Ульяновск: УЛГТУ, 2021. – С. 116–123.
12. Sergeev V., Frolov I., Radaev O. Measurement of the LED electroluminescence 3dB frequency at low currents // *2023 IX International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT). Proceedings.* (Samara, Russian Federation, 17-21 April 2023). <https://doi.org/10.1109/ITNT57377.2023.10139230>
13. Frolov I.V., Segeev V.A., Radaev O.A. The Method for Measuring the Distribution Profile of the 3dB Frequencies of Electroluminescence Over the Area of the LED Chip // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2023. – V. 72. – P. 5000806 <https://doi.org/10.1109/TIM.2022.3206812>

Для цитирования:

Сергеев В.А., Фролов И.В., Зайцев С.А., Радаев О.А. Контроль качества светодиодных СОВ матриц по пороговому току. // *Журнал радиоэлектроники*. – 2023. – №. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.11.6>