

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.8.2>

УДК 621.382

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТОДИОДНЫХ МАТРИЦ БОРТОВОГО СВЕТИЛЬНИКА ПРИ ТОКОВЫХ ИСПЫТАНИЯХ

И. В. Фролов<sup>1</sup>, В. А. Сергеев<sup>1,2</sup>, А. М. Ходаков<sup>1</sup>, С. А. Зайцев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова  
Российской академии наук, 432071, г. Ульяновск, ул. Гончарова, д. 48/2

<sup>2</sup>Ульяновский государственный технический университет, 432027, г. Ульяновск, ул.  
Северный венец, д. 32

Статья поступила в редакцию 12 июля 2021 г.

**Аннотация.** Представлены результаты исследований изменения характеристик светодиодных COB матриц типа GW P9LR31.EM - DURIS S 8 в составе светодиодного светильника при его испытаниях под действием постоянного тока в непрерывном режиме и в режиме электроциклирования. Матрицы состоят из восьми последовательно соединенных кристаллов InGaN/GaN светодиодов, покрытых люминофором. Расчет в среде Comsol Multiphysics температурного поля светильника при номинальном рабочем токе и свободном конвекционном теплообмене показал, что максимальный перегрев матриц не превышает 46 К, а различие их температур – 2 К. При этом экспериментальные значения тепловых сопротивлений матриц реального светильника имеют разброс от 42 до 58 К/Вт; до испытаний вольт-амперные характеристики матриц заметно различаются уровнем тока утечки в диапазоне напряжений от 14 В до 19 В, а светодиоды в составе матриц светильника имеют значительный разброс по яркости излучения в режиме микротоков. Степень этого разброса в пределах каждой матрицы оценивалась путем измерения яркости свечения каждого кристалла матрицы и вычисления коэффициента вариации  $\gamma$ . Установлено, что коэффициент вариации яркости излучения кристаллов COB матрицы, измеренной при токе 100 нА, сильно коррелирует с током утечки. При испытаниях светильника под действием постоянного тока наиболее существенные изменения электрофизических и оптических характеристик COB матриц наблюдаются в диапазоне микротоков: распределение яркости

излучения кристаллов матриц при токе 100 нА становится более однородным. Наибольшие изменения характеристик матриц наблюдались после первых 700 часов испытаний, то есть на этапе приработки. При этом корреляции между степенью изменения характеристик матриц при испытаниях и их тепловыми сопротивлениями не выявлено.

**Ключевые слова:** светильник, COB матрица, испытания, контроль характеристик.

**Abstract.** The paper presents the results of studies of changes in the characteristics of LED COB matrices of the GW P9LR31.EM - DURIS S 8 type as part of a LED luminaire when tested under the direct current in a continuous mode and in an electrocycling mode. The arrays consist of eight InGaN/GaN LED dies connected in series, coated with a phosphor. Calculation in the Comsol Multiphysics environment of the temperature field of the luminaire at the rated operating current and free convection heat transfer showed that the maximum overheating of the matrices does not exceed 46 K, and the difference in their temperatures is 2 K. At the same time, the experimental values of the thermal resistances of the matrices of a real lamp vary from 42 to 58 K/W. Before testing, the *I-V* characteristics of the matrices differ markedly in the level of leakage current in the voltage range from 14 V to 19 V, and the LEDs in the luminaire matrices have a significant spread in the brightness of emission in the microcurrent mode. The degree of this scatter within each matrix was estimated by measuring the luminescence brightness of each die of the matrix and calculating the coefficient of variation  $\gamma$ . It was found that the coefficient of variation of the emission brightness of the COB matrix dies measured at a current of 100 nA strongly correlates with the leakage current. When testing a luminaire under the direct current, the most significant changes in the electrophysical and optical characteristics of COB matrices are observed in the range of microcurrents: the distribution of the emission brightness of the matrix dies at a current of 100 nA becomes more uniform. The greatest changes in matrix characteristics were observed after the first 700 hours of testing, that is, at the running-in stage. At the same time, no correlation was found between the degree of change in the characteristics of the matrices during tests and their thermal resistances.

**Key words:** luminaire, COB matrix, testing, monitoring of characteristics.

## Введение

Благодаря высокой эффективности преобразования электрической энергии в оптическую светоизлучающие приборы на основе полупроводниковых гетероструктур широко используются в устройствах индикации и освещения. В последние годы светодиоды и светодиодные матрицы все активнее применяются в качестве источников света в автомобильных фарах, бортовых сигнальных и навигационных огнях самолетов и т.д. Надежность таких устройств определяется качеством их изготовления и качеством светодиодов и светодиодных матриц, входящих в состав устройства, а ресурс работы во многом зависит от условий эксплуатации, в первую очередь, от температуры и режима токовой нагрузки. При производстве устройств светодиодного освещения контроль светотехнических и теплофизических характеристик проводят в рабочем режиме питания [1, 2]. Однако, как показано в работах [3-5], электрофизические и электрооптические характеристики светодиодов и светодиодных матриц, измеренные в диапазоне малых токов и напряжений, являются чувствительными к дефектам структуры и могут использоваться для прогнозирования темпа деградации. В связи с этим актуальной является задача исследования изменений характеристик светодиодов и светодиодных матриц в составе светодиодных осветительных устройств при испытаниях в различных режимах эксплуатации и разработка методик оценки качества светодиодных устройств по значениям характеристик светодиодов и матриц, измеренным в диапазоне малых токов.

### 1. Конструкция и тепловая модель светильника

Исследованный светильник изготовлен из шести параллельно включенных светодиодных COB (chip on board) матриц типа GW P9LR31.EM - DURIS S 8. Основание светильника выполнено из алюминия. Матрицы припаяны к основанию припоем Sn62Pb36Ag2, толщина припоя составляет 50 мкм. Светодиодные COB матрицы имеют размеры 5×5×0.7 мм и состоят из восьми последовательно соединенных кристаллов InGaN/GaN светодиодов,

покрытых люминофором. Номинальное значение напряжения питания матрицы составляет 24 В, максимальный ток 200 мА.

Конструкция светодиодного светильника и стационарное распределение температуры в ней при питании каждой матрицы током 50 мА, то есть при рассеиваемой мощности  $P_T = 1,1$  Вт, приведены на рис. 1.

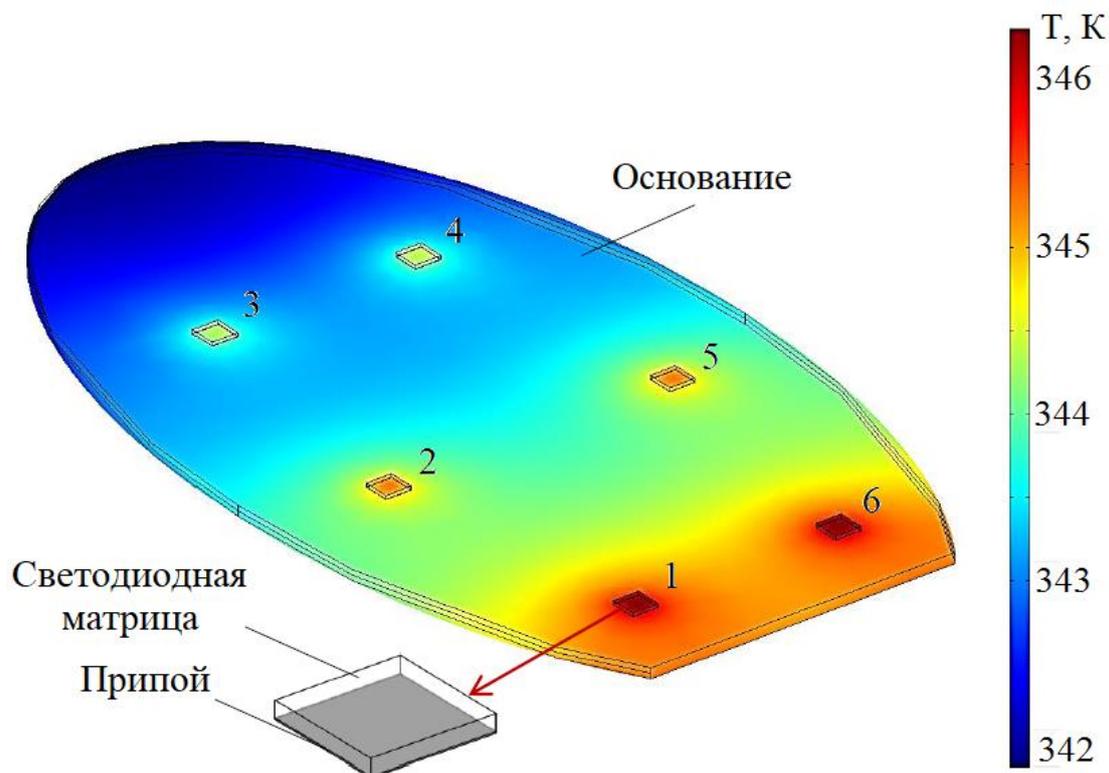


Рис. 1. Конструкция и температурное поле светодиодного светильника.

Температурное поле светильника рассчитывалось путем решения в среде физического моделирования Comsol Multiphysics уравнения теплопроводности при задании на верхней поверхности светодиодных матриц плотности рассеиваемой мощности, а на всех других внешних поверхностях светильника – условия естественного конвективного теплообмена с воздухом температурой 300 К. Как видно из рисунка, максимальный перегрев  $\Delta T_{\max}$  наблюдается у матриц №1 и №6 и составляет 46 К, а минимальный  $\Delta T_{\min}$  у матриц №3 и №4 примерно 44,5 К. Это различие обусловлено геометрией несущей платы светильника и краевыми эффектами теплоотвода. Модельное значение теплового сопротивления

матрицы можно оценить по формуле  $R_{TM} = (\Delta T_{max} + \Delta T_{min}) / 2P_T$  и для полученных расчетных значений составляет примерно 41,2 К/Вт.

Для оценки качества монтажа матриц на алюминиевой плате светильника модуляционным методом с помощью аппаратно-программного комплекса для измерения тепловых характеристик полупроводниковых приборов [6] у каждой матрицы был измерен модуль теплового импеданса при токе 70 мА в диапазоне частот от 900 Гц до 0,032 Гц. В качестве температурочувствительного параметра использовалось падение напряжения на защитном диоде, встроенном в светодиодную матрицу. Результаты измерений представлены на рис. 2.

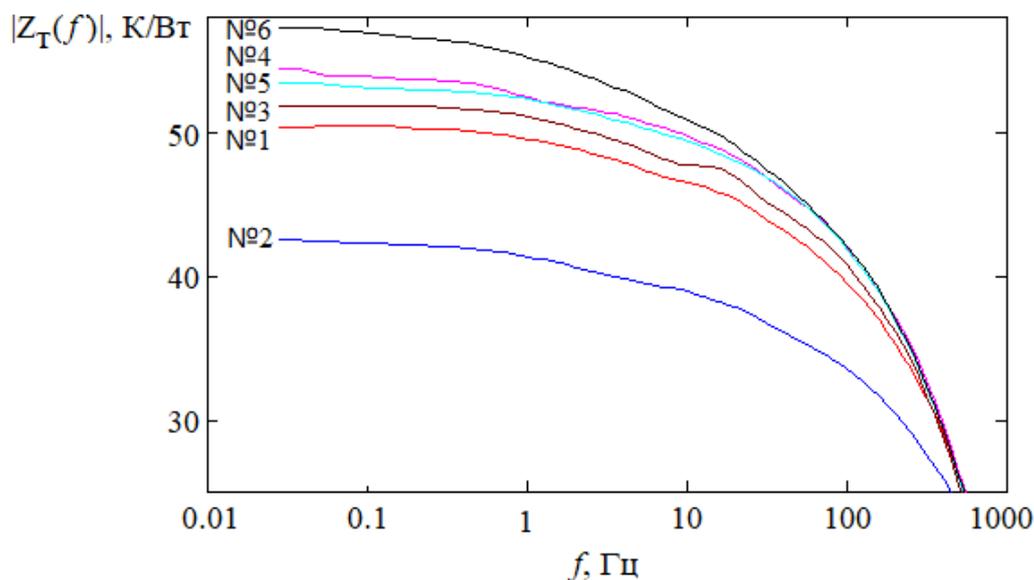


Рис. 2. Зависимости модуля теплового импеданса светодиодных матриц от частоты греющей мощности.

Согласно принципу теплоэлектрической аналогии эквивалентная тепловая схема полупроводникового прибора плоскостройной конструкции, состоящей из  $n$  слоев с заданными геометрическими размерами и теплофизическими параметрами материалов, нижним основанием размещенной на идеальном теплоотводе, в представлении Фостера имеет вид  $n$  последовательно соединенных  $R_{Ti}C_{Ti}$ -звеньев, где  $R_{Ti}$  и  $C_{Ti}$  – тепловое сопротивление и теплоемкость  $i$ -го слоя конструкции соответственно. Значение модуля теплового импеданса прибора, измеренное на низкой частоте модуляции греющей мощности, соответствует тепловому сопротивлению

переход-корпус  $R_{\text{П-к}}$  и определяет эффективность отвода тепла от кристалла к теплоотводу.

Тепловое сопротивление  $R_{\text{П-к}}$ , измеренное для шести светодиодных матриц светильника, характеризуется существенным разбросом значений от 42 К/Вт до 58 К/Вт, что определяется главным образом качеством паяного соединения. Значение теплового сопротивления  $R_{\text{П-к}}$  матрицы №2 практически соответствует идеальному модельному значению  $R_{\text{ТМ}}$ . Значения теплового сопротивления остальных матриц светильника существенно больше модельного. Это означает, что температуры перегрева матриц реального светильника и различие этих температур при испытаниях и эксплуатации будут существенно превышать модельные значения.

## 2. Режимы и результаты испытаний

Испытания светильника проводились при комнатной температуре на открытом воздухе. В течение первых 700 ч светильник работал в непрерывном режиме при питании постоянным током 350 мА. Затем испытания были продолжены в режиме электроциклирования при токе 380 мА. Длительность цикла составляла 45 мин, из которых 15 мин светильник находился во включенном состоянии. После 300 проведенных циклов длительность цикла была сокращена до 30 мин, из которых 15 мин светильник находился во включенном состоянии. Число циклов в указанном режиме испытаний составило 1600. В режиме электроциклирования температура светодиодных матриц изменялась от 25 °С при выключенном питании до 50 °С при включенном питании. Время выхода светильника в стационарный тепловой режим составляло порядка 10 мин. Общее время испытаний светильника составило 1725 ч, из которых 1200 ч светильник находился во включенном состоянии.

В процессе испытаний контролировались вольт-амперные, вольт-фарадные характеристики, зависимости модуля теплового импеданса от частоты импульсов греющей мощности, профиль распределения яркости электролюминесценции по кристаллам светодиодных матриц, а также поле распределения температуры по площади светильника.

Вольт-амперные характеристики исследованных COB матриц (рис. 3) имеют существенные различия в диапазоне напряжений от 14 В до 19 В, в котором проводимость структуры в основном определяется туннелированием носителей заряда через ловушки, а величина тока пропорциональна плотности дефектов светоизлучающей структуры [5, 7]. В процессе испытаний светильника происходят изменения вольт-амперных характеристик COB матриц (рис. 4), причем наиболее существенные изменения отмечаются так же в диапазоне напряжений от 14 В до 19 В.

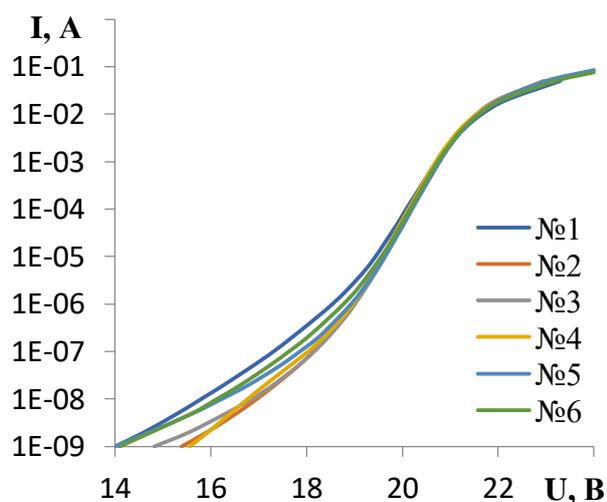


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики COB матриц до испытаний.

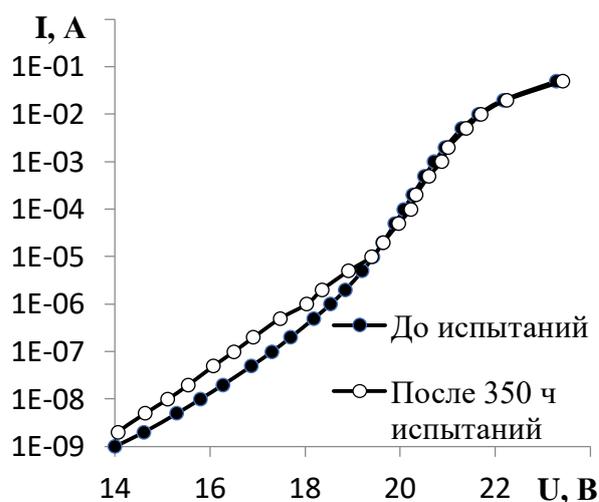


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика COB матрицы №1 до и после испытаний.

Для более подробного исследования и выявления причин различий характеристик COB матриц в области малых напряжений были измерены профили распределения яркости электролюминесценции светодиодных кристаллов в составе COB матриц при токе 100 нА. Измерения выполнялись цифровой камерой FL-20BW с разрешением 5472×3648, используемой в составе микроскопа Levenhuk D320L [8]. Результаты измерений показали, что все матрицы, входящие в состав светильника, характеризуются неоднородным профилем распределения яркости свечения кристаллов, что связано с различием вольт-амперных характеристик (рис. 5, а).

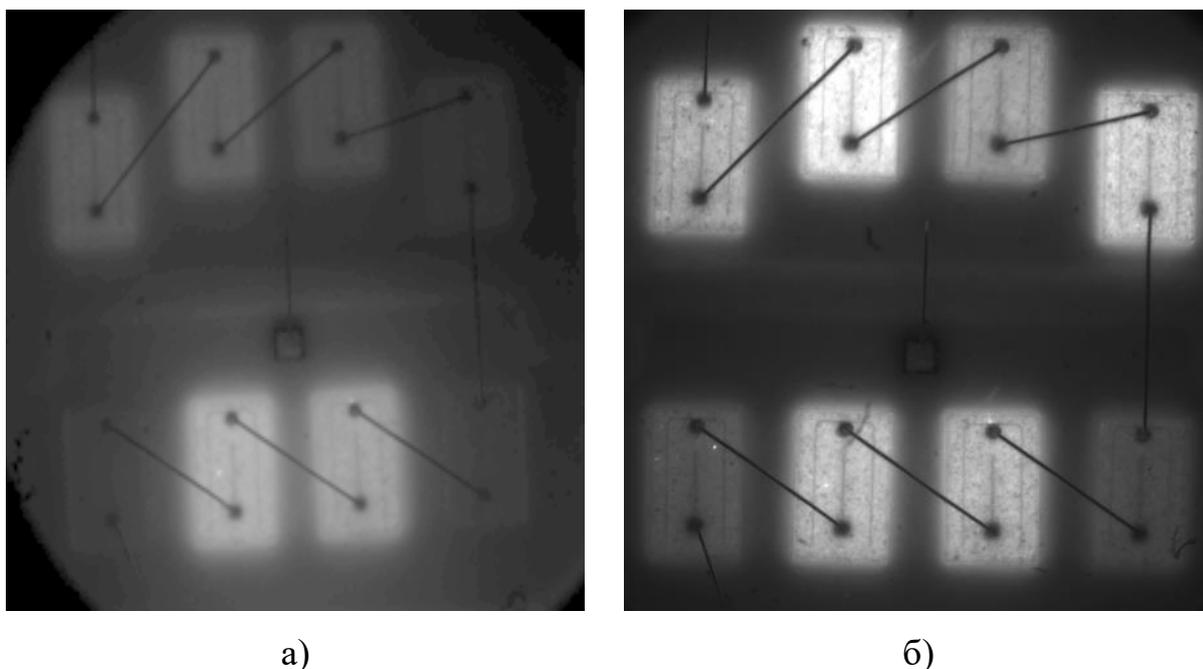


Рис. 5. Профили распределения яркости электролюминесценции кристаллов СОВ матрицы №1, измеренные при токе 100 нА:  
а) до испытаний; б) после 925 ч испытаний.

Оценка степени неоднородности профиля проводилась путем измерения яркости свечения каждого кристалла, вычисления среднего значения  $P_{CP}$ , среднего квадратического отклонения  $\sigma$  и коэффициента вариации  $\gamma = \sigma/P_{CP}$ . Результаты измерений показали, что исследованные СОВ матрицы характеризуются различием коэффициента вариации яркости свечения кристаллов: коэффициент  $\gamma$  принимает значения от 0.20 до 0.82. Это указывает на значительную неоднородность профиля распределения яркости. Установлено, что при испытаниях профиль распределения яркости электролюминесценции кристаллов матриц становится более однородным (рис. 5, б), а коэффициент вариации после 1725 ч испытаний  $\gamma$  принимает значения в диапазоне от 0.23 до 0.38 (табл. 1).

Наибольшие изменения степени однородности профиля происходят в первые 700 часов испытаний, что указывает на прохождение этапа ранней (быстрой) деградации характеристик светодиодных матриц за указанное время [5].

Таблица 1. Коэффициент вариации яркости свечения кристаллов COB матриц

Время испытаний, ч Номер COB матрицы	$\gamma$ , отн. ед.				
	0	350	700	925	1725
1	0.82	0.70	0.36	0.29	0.38
2	0.20	0.32	0.14	0.17	0.28
3	0.23	0.45	0.24	0.22	0.25
4	0.37	0.37	0.30	0.07	0.33
5	0.37	0.55	0.25	0.20	0.23
6	0.53	0.67	0.32	0.14	0.35

Определено, что COB матрицы, характеризующиеся большой степенью неоднородности профиля яркости кристаллов, имеют большой ток утечки, определяемый по вольт-амперной характеристике в диапазоне напряжений 14 – 19 В. На рис. 6 приведено корреляционное поле между коэффициентом  $\gamma$  и током светодиода, измеренным при напряжении 17 В до проведения испытаний. Коэффициент корреляции равен 0,99.

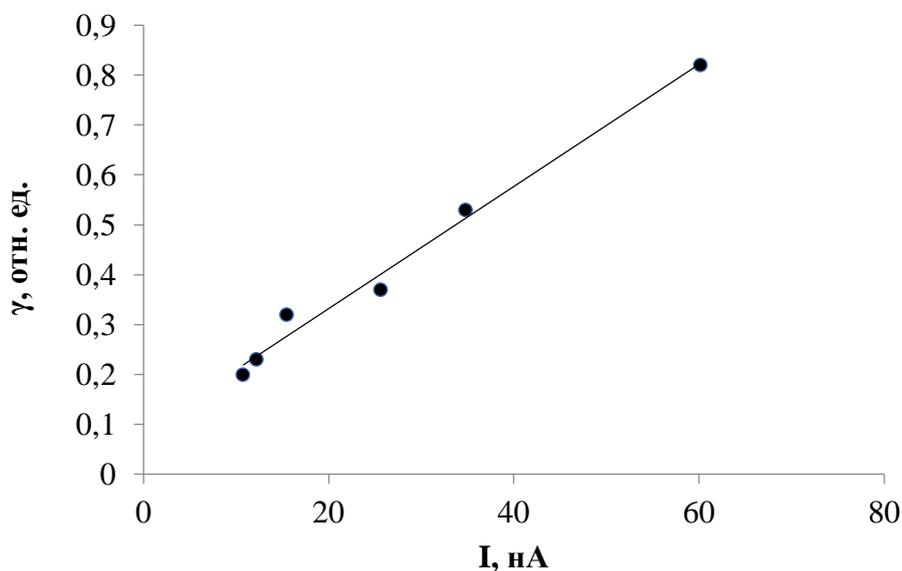


Рис. 6. Поле корреляции между током утечки COB матриц и коэффициентом вариации яркости свечения кристаллов.

Представленные результаты показывают, что различия в параметрах вольт-амперных и ватт-амперных характеристик исследованных светодиодных COB матриц в большей степени проявляются в диапазоне токов начала свечения.

Известно, что разброс характеристик определяется стабильностью технологического процесса изготовления светодиодной структуры и определяет их качество. Следовательно, при производстве светодиодных устройств важно проводить отбраковку светодиодов и светодиодных матриц по электрическим и электрооптическим параметрам, измеренным, в том числе, в диапазоне токов начала свечения.

### **Заключение**

Экспериментально показано, что значения тепловых сопротивлений шести параллельно соединенных светодиодных СОВ матриц, входящих в состав бортового светодиодного светильника, имеют большой разброс и у большинства матриц превышают модельное значение. Вольт-амперные характеристики матриц имеют существенные различия в диапазоне напряжений от 14 В до 19 В, в котором уровень тока утечки пропорционален плотности дефектов светоизлучающей структуры. Профиль распределения яркости свечения кристаллов светодиодов, входящих в состав матриц, в режиме микротоков имеет существенно неравномерный характер. Выявлена сильная корреляционная связь между значениями токов утечки и коэффициентами вариации яркости свечения кристаллов матрицы. В процессе испытаний светильника при постоянном токе 350 мА в непрерывном режиме работы в течение 700 ч и в режиме электроциклирования в течение 1025 ч при токе 380 мА наиболее существенные изменения электрофизических и световых характеристик СОВ матриц светильника наблюдаются в диапазоне микротоков. При этом корреляционной связи между степенью изменения характеристик матриц при испытаниях и их тепловыми сопротивлениями не выявлено, что свидетельствует о нетепловом механизме изменений характеристик светильника при испытаниях в заданных режимах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Ульяновской области, проект №19-47-730002 р-а.

## Литература

1. ГОСТ Р 55705-2013. Приборы осветительные со светодиодными источниками света. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2014.
2. Dousoky G.M., Ali Z.M.M., Elsayy A.M. An experimental evaluation of photometric performance and power quality of led lamps in different operating conditions. *Journal of Advanced Engineering Trends*. 2020. Vol.39. No.2. P. 157-166. <https://doi.org/10.21608/JAET.2020.96454>
3. 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/10.1134/S1063785017020250>
4. Frolov I., Radaev O. Sergeev V. Installation for Measuring of the Slope of the P-I Characteristic of the LED in the Range of the Electroluminescence Start Currents. *2020 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE' 2020). Materials of the International Scientific And Technical Conference (Saratov, September 24-25, 2020)*. Saratov, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov. P.262-264. <https://doi.org/10.1109/APEDE48864.2020.9255413>
5. Renso N., De Santi C., Caria A., Torre F. D., Zecchin L., Meneghesso G., Zanoni E., Meneghini M. Degradation of InGaN-based LEDs: Demonstration of a recombination-dependent defect-generation process. *Journal of Applied Physics*. 2020. Vol.127. P.185701. <https://doi.org/10.1063/1.5135633>
6. Смирнов В.И., Сергеев В.А., Гавриков А.А. измерение теплового импеданса светодиодов и светодиодных матриц. *Измерительная техника*. 2017. №1. С.33-36. <https://doi.org/10.1007/s11018-017-1157-8>
7. Quitsch W.A., Sager D., Loewenich M., Meyer T., Hahn B., Bacher G. Low injection losses in InGaN/GaN LEDs: The correlation of photoluminescence, electroluminescence, and photocurrent measurements. *Journal of Applied Physics*. 2018. Vol.123(21). P.214502. <https://doi.org/10.1063/1.5022026>

8. Frolov I.V., Radaev O.A., Sergeev V.A. Measurement and analysis of the recombination coefficients distribution on the area of light-emitting InGaN/GaN heterostructures. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol.1410. P.012092. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1410/1/012092>

**Для цитирования:**

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. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.8.2>