

Известия Алтайского государственного университета. 2024. № 1 (135). С. 50–55.  
Izvestiya of Altai State University. 2024. No 1 (135). P. 50–55.

Научная статья  
УДК 535.243:621.382.2:621.3.082.56  
DOI: 10.14258/izvasu(2024)1-06

### **Исследование тепловых режимов светодиодных источников света**

*Мария Андреевна Романова*

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия,  
rma-rda@yandex.ru

Original article

### **Study of Thermal Modes of LED Light Sources**

*Maria A. Romanova*

V.A. Trapeznikov Institute of Control Science RAS, Moscow, Russia,  
rma-rda@yandex.ru

В работе представлены результаты исследования закономерностей и взаимного влияния электрических и тепловых параметров на фотометрические характеристики светодиодов, помещенных в конструкцию миниатюрного осветительного прибора. Описана процедура проведения экспериментов и получения измерительной информации об изменении фотометрических характеристик и спектральных характеристик излучения светодиодов в зависимости от электрических и температурных режимов. Также были проведены исследования спектрального состава осветительного прибора, в конструкцию которого входит исследуемый светодиод. Результаты наблюдений позволяют подтвердить гипотезу об отклонении характеристик светодиодов в составе осветительного прибора в зависимости от изменения режимов работы. В результате анализа полученных зависимостей установлено изменение мощности излучения и количество мощности, выделяющейся в виде тепла. Разработана методика, позволяющая подстраивать параметры (электрические и тепловые) светодиодов и определять режимы работы источника света в целом для создания энергоэффективного светодиодного источника света.

**Ключевые слова:** светодиодное устройство, тепловой режим, температурное поле, световой поток, цветовая температура, мощность

**Для цитирования:** Романова М.А. Исследование тепловых режимов светодиодных источников света // Известия Алтайского государственного университета. 2024. № 1 (135). С. 50–55. DOI: 10.14258/izvasu(2024)1-06.

The paper presents the results of investigating the regularities and mutual influence of electrical and thermal parameters on the photometric characteristics of LEDs integrated into the construction of a miniature lighting device. The experimental procedure for conducting experiments and obtaining measurement information about changes in the photometric and spectral characteristics of LED emissions based on electrical and temperature conditions is described. Additionally, research was conducted on the spectral composition of the lighting device, which includes the studied LED. The observed results confirm the hypothesis of deviations in the characteristics of LEDs within the lighting device depending on changes in operating modes. Through the analysis of obtained dependencies, changes in radiant power and the amount of power dissipated as heat were determined. A methodology has been developed to adjust the parameters (electrical and thermal) of LEDs and determine the operating modes of the light source as a whole to create an energy-efficient LED light source.

**Keywords:** LED device, thermal mode, temperature field, luminous flux, color temperature, power

**For citation:** Romanova M.A. Study of Thermal Modes of LED Light Sources. *Izvestiya of Altai State University*. 2024. No 1 (135). P. 50-55. (In Russ.). DOI: 10.14258/izvasu(2024)1-06.

**Введение**

В условиях растущего применения светодиодных систем освещения обеспечение оптимальной производительности и надежности системы становится обязательным требованием за счет управления температурным режимом. Процесс исследования тепловых режимов светодиодных устройств можно разделить по направлениям: измерение теплового сопротивления, термическое моделирование, измерение рабочей температуры, температурные испытания, дизайн охлаждения, анализ данных.

Известно, что для расчета срока службы и срока эксплуатации светодиодных источников света используется снижение полного светового потока [1]. Этот показатель не всегда верно отображает срок эксплуатации всего светильника, так как уменьшение светового потока является только одной из нескольких составляющих, которые оказывают влияние на надежность светильника в целом. Снижение светового потока происходит по многим причинам, но основная причина — это накопление тепла в люминесцентных материалах, приводящее к структурному повреждению. Постоянное увеличение тока, мощности и усложнение светодиодного источника света требует дополнительных изысканий в области тепловых процессов, проходящих в отдельно взятых светодиодах и уже в составе конструкции источника света. При этом стоит анализировать распределение температурных полей по всей площади поверхности светодиодного источника света. Поэтому исследования изменений значений характеристик светодиодных источников света при различных электрических и тепловых режимах работы актуальны (в работе исследуются стационарные режимы). Стабильность основных световых характеристик источника света (световой поток, световая отдача, цветовая температура) во времени не может определяться только характеристиками светодиодов. Производители зачастую указывают именно срок службы светодиодов, когда в светильнике из-за перегрева светодиоды могут работать меньше заявленного производителем срока (при нормальных условиях работы сроки службы светодиодов и всего светильника могут незначительно отличаться) [2–5].

**1. Методика исследования**

Температура активной области кристалла является одним из важнейших параметров полупроводниковых светодиодов на основе нитрида галлия, которая в значительной степени определяет величину световой отдачи, спектр излучения [6]. Для исследуемых в работе гетероструктур GaN-InGaN со множественными квантовыми ямами, используемых при изготовлении источников света, температурная зависимость ширины линии излучения на уровне 0,5 от максимального значения имеет следующий вид [7]:

$$[\Delta E]_{0.5} \approx 3 \div 4kT, \quad (1)$$

где  $[\Delta E]_{0.5}$  — ширина запрещенной зоны;  $k$  — постоянная Больцмана;  $T$  — термодинамическая температура.

Для прогнозирования стабильной работы светодиодного устройства важно знать не только усредненную температуру по кристаллу, но и неравномерность распределения температурного поля в самой конструкции светодиодного источника света. В связи с повышением градиента температур наблюдаются образование дислокаций, отслаивание и микротрещины люминофорного покрытия и разрушение самого кристалла. При этом чувствительность такого параметра, как полуширина спектра излучения, в два раза выше, чем чувствительность к температуре сдвига длины волны максимума спектра излучения. Следовательно, температурную зависимость ширины спектра возможно использовать для контроля температуры активной области. Для этого необходимо определить температурный коэффициент (приращение ширины спектра при нагреве на один градус, нм/К), проводя измерения ширины при нескольких значениях температуры кристалла [7].

Для проведения аналитических исследований фотометрических характеристик светодиодных устройств был подобран измерительный прибор AvaSpec-2048. Модульная конструкция прибора позволяет на ее основе составлять измерительную систему под различные экспериментальные требования. Для анализа измерений используется специализированное программное обеспечение AvaSoft, предварительно установленное на компьютере. Под исследования температурных зависимостей светодиодных устройств был собран (рис. 1) измерительный комплекс с интеграцией дополнительных измерительных элементов, включая термопару, мультиметр и оптический компонент — сферу.

Корпус светодиодного устройства подвергался нагреву в диапазоне температур от комнатной до +100 °С. Результаты аналитических исследований спектрофотометром фиксировались каждые 10 °С изменения температуры корпуса. Характерной особенностью исследуемых светодиодных устройств является присутствие двух пиков, связанных с кристаллом и люминофором. Представлены спектры исследуемых светодиодных устройств, полученные при различных уровнях тока (рис. 2). Заметно, что увеличение тока приводит к смещению пиков в сторону более длинных волн и увеличению интенсивности.

С повышением силы тока изменяются все фотометрические величины светодиодных устройств: интенсивность, световой поток, также происходит заметное изменение спектров источников света. Кроме того, за счет увеличения силы тока, подаваемого на свето-

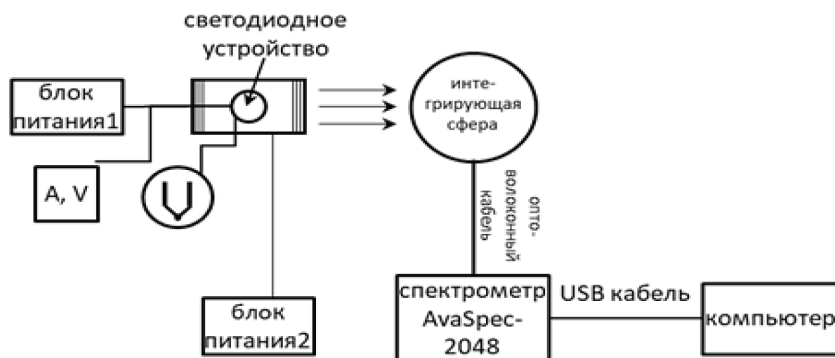


Рис. 1. Функциональная схема измерительного комплекса для проведения исследований температурных зависимостей

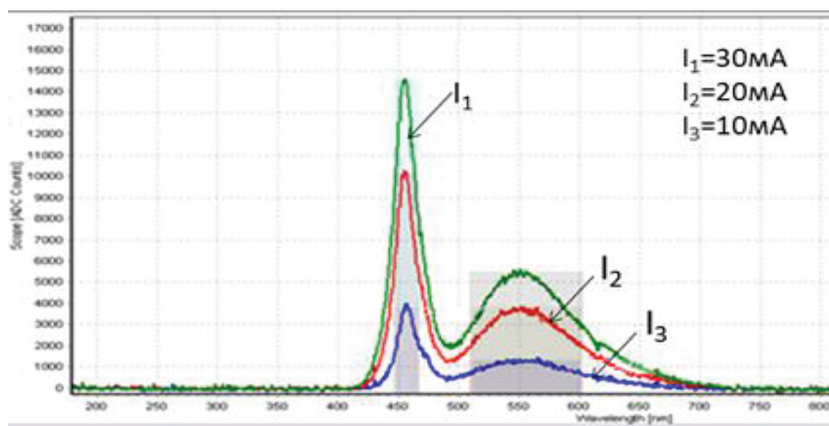


Рис. 2. Изменение полуширины спектров излучения «белых» светодиодных устройств

диодное устройство, происходит повышение температуры кристалла, что вызывает смещение спектра в область синего цвета, т.е. излучаемый свет становится более холодным (изменяется его цветовая температура). Длинноволновое смещение спектра излучения связано с изменением ширины запрещенной зоны, происходящим вследствие повышения температуры [8–10].

## 2. Результаты исследования

Так как все параметры полупроводникового источника света зависят от термодинамической температуры кристалла и люминофора, то и цветовая температура как параметр источника света является термозависимой величиной. На рисунке 3 представлена зависимость цветовой температуры светодиодных устройств КИПД154А92 от температуры их корпуса.

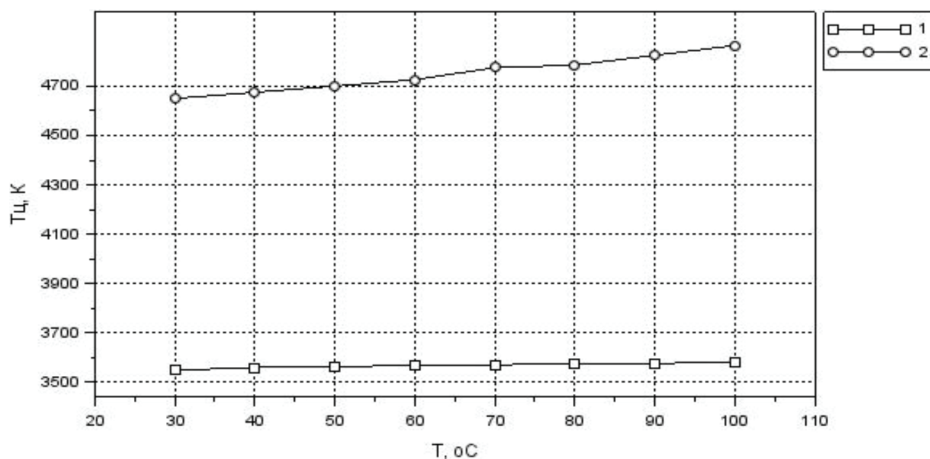


Рис. 3. Зависимость цветовой температуры светодиодных устройств КИПД154А92 от температуры корпуса: 1 — «теплый свет», 2 — «холодный свет»

Полученные зависимости показывают, что при повышении температуры корпуса светодиодных устройств увеличивается и их цветовая температура. В большей степени это проявляется для светодиодных устройств «холодного света». Их цветовая температура увеличилась с 4650 до 4830 К, т.е. на 180 К. Цветовая температура источников теплого света изменилась с 3550 до 3580 (на 30 К). Такое отличие для светодиодных устройств теплого и холодного света связано с различиями в составах люминофорных покрытий.

Светодиодные лампы (светодиодное устройство) вызывают гораздо больший интерес, чем отдельные светодиоды, так как имеют более широкое практиче-

ское применение. Они имеют в своем составе несколько полупроводниковых кристаллов, а также стабилизатор тока, балластный резистор и диодный мост. Из-за усложненной конструкции параметры светодиодных ламп могут отличаться от параметров отдельных светодиодов при одинаковых условиях работы. В этой связи стало интересным исследование температурных зависимостей параметров светодиодных ламп ЛПМ26.

Представлена температурная зависимость полуширины пиков кристалла и люминофора (рис. 4). Как правило, при увеличении температуры спектр излучения уширяется, его максимум сдвигается в сторону низких энергий.

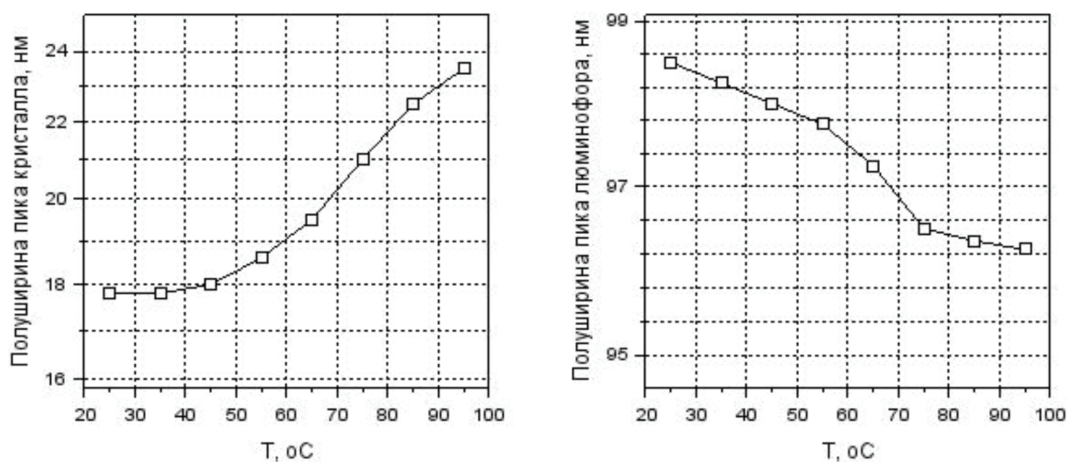


Рис. 4. Температурная зависимость полуширины пиков кристалла и люминофора лампы ЛПМ26

Повышение температуры корпуса лампы в процессе эксплуатации вызывает изменение основных параметров ламп, таких как цветовая температура и интенсивность излучения, что, в свою очередь, оказывает негативное влияние на коэффициент цветопередачи используемых источников света и их качество.

### 3. Подход к исследованию тепловых режимов

Электрическая энергия, преобразуемая в тепло, является главным параметром, задаваемым при расчете тепловых режимов светодиодного светового прибора. Она определяется разностью потребляемой электрической мощности светового прибора и мощности, преобразуемой в свет, или по формуле (2):

$$P_{\text{т}} \cong (1 - \eta_{\text{с}} / \eta_{\text{теор}}) P, \quad (2)$$

где  $P$  — мощность, потребляемая системой светодиодов белого излучения,  $\eta_{\text{с}}$  — световая отдача светодиодов,  $\eta_{\text{теор}}$  — световая эффективность излучения выбранного светодиода.

Значение световой эффективности излучения  $\eta_{\text{теор}}$  может быть рассчитано, исходя из спектральной

характеристики излучения светодиодного устройства. Таким образом, в расчетах электрической энергии, преобразуемой в тепло, учитывается спектральное распределение излучения конкретного типа светодиода. Корректный расчет данной мощности позволяет более точно рассчитать температуру корпуса, а соответственно, и р-п перехода. Мощность, преобразуемая в тепло, в литературе оценивается в пределах 40–75 %. Зачастую этой величиной и вовсе пренебрегают [11, 12].

Проведенные исследования тепловых режимов светодиодных ламп и модулей в разделах выше позволяют сформировать методику исследования:

- 1) установить критические характеристики светодиодов, входящих в состав светодиодных источников света;
- 2) определить вольтамперную характеристику светодиодного источника света;
- 3) установить зависимость электрической мощности от изменения тока;
- 4) установить температурную зависимость корпуса светодиодного источника света от рабочего времени;

5) рассчитать мощность, преобразуемую в тепловую энергию, с учетом установленных зависимостей в п. 3 и 4;

6) установить зависимость мощности излучения от рабочего тока;

7) рассчитать световую эффективность излучения светодиодного источника света;

8) произвести контрольные измерения цветовой температуры от температуры корпуса светодиодного источника света;

9) подобрать электрические параметры светодиода одного источника света в зависимости от световой эффективности.

На основании приведенной методики были вычислены доли мощности, преобразуемые в тепловую энергию  $P_T$ , а также световая эффективность; результаты расчета приведены в таблице.

Относительные значения тепловой мощности и расчетные предельные значения световой эффективности

T, К	3500 К	4000 К	4500 К
$P_T$ , отн.ед.	0,688	0,662	0,634
$\eta_{теор}$ , лм/Вт	263	277	289

### Заключение

Актуальность работы обусловлена необходимостью учета различных характеристик как светодиодов, так и осветительных приборов. Полученные зависимости позволяют установить взаимосвязь между силой тока и цветовой температурой. Предложенная методика исследования тепловых режимов светодиодных источников света позволяет проводить ком-

плексные измерения и формировать исследовательскую базу для повышения надежности осветительных приборов. Перспективой настоящей работы является создание измерительной методики для проведения выборочного контроля светодиодов и осветительных приборов.

### Библиографический список

- ГОСТ 59666-2021. Освещение искусственное. Метод определения коэффициента эксплуатации осветительных установок. М.: ФГБУ «РСТ», 2021. 28 с.
- Плотников В.В., Курамшина Л.Ф., Вахитов А.Р. Некоторые аспекты проектирования систем управления светом // Вестник Казанского технологического университета. 2013. № 4. С. 235–239.
- Chincherо H.F., Alonso J.M. A Review on Energy Management Methodologies for LED Lighting Systems in Smart Buildings // 2020 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe). Madrid: IEEE. 2020. P. 1–6. DOI: 10.1109/EEEIC/ICPSEurope49358.2020.9160796
- Kalani M.J., Naderi M.S., Gharehpetian G.B. Power Consumption Control of LEDs Considering Their Specific Characteristics and Ambient Temperature Variations // Computers and Electrical Engineering. 2019. Vol. 77. P. 191–204. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2019.05.007
- Mamchenko M.V., Romanova M.A. Approach to Remote Control and Detection of Degradation of LEDs in IoT Devices // Proceedings of the 15th International Conference Management of Large-Scale System Development (MLSD). M.: IEEE. 2022. P. 716–721. DOI: 10.1109/MLSD55143.2022.9934462
- Мальцев А.А., Мальцев И.А. Контроль качества и надежности светодиодов по тепловому сопротивле-
- нию p-n-переход — корпус // Полупроводниковая светотехника. 2010. № 2. С. 40–41.
- Гончарова Ю.С., Романова М.А., Смирнов С.В. Спектральный метод бесконтактного измерения температуры кристаллов полупроводниковых источников света // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2015. № 2 (36). С. 38–40.
- Abdelmlek K.B., Araoud Z., Canale L., Nejma F.B., Charrada K., Zissis G. Thermal Management of LEDs Packages within Inclined Enclosures for Lighting Applications // 2021 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS). Vancouver: IEEE. 2021. P. 1–6. DOI: 10.1109/IAS48185.2021.9677379
- Hsu H., Wu S., Li J., Su J., Huang J., Fu S. Thermal Design for High Power Arrayed LED Heat-Dissipating System // 2013 8th Int. Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT). Taipei: IEEE. 2013. P. 222–225. DOI: 10.1109/IMPACT.2013.6706685
- Purwanto E., Dupuis P., Canale L., Sinisuka N.I., Zissis G. Aging Study of Remote Luminophore at Ambient Temperature // 2019 IEEE Int. Conf. on Environ. and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe). Genova: IEEE. 2019. P. 1–5. DOI: 10.1109/EEEIC.2019.8783248
- Сулейманов С.Р. Нагревание люминофора в светодиоде // Высокие технологии в современной науке и тех-

нике : сборник научных трудов V Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, г. Томск, 5–7 декабря. Томск: STT. 2016 г. 2016. С. 243–244.

12. Yung K.C., Liem H., Choy H.S. Heat Transfer Analysis of a High-Brightness LED Array on PCB under Different Placement Configurations // *Journal International Communications in Heat and Mass Transfer (ICHMT)*. 2014. Vol. 53. P. 79–86. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.02.014

## References

1. GOST 59666-2021. *Artificial Lighting. Method Determination of the Operating Coefficient of Lighting Installations*. Moscow: RST, 2021. 28 p. (In Russ.).
2. Plotnikov V.V., Kuramshina L.F., Vakhitov A.R. Some Aspects of the Design of Light Control Systems. *Bulletin of Kazan Technological University*. 2013. No 4. P. 235–239. (In Russ.).
3. Chinchero H.F., Alonso J.M. A Review on Energy Management Methodologies for LED Lighting Systems in Smart Buildings. *2020 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)*. Madrid: IEEE. 2020. P. 1–6. DOI: 10.1109/EEEIC/ICPSEurope49358.2020.9160796
4. Kalani M.J., Naderi M.S., Gharehpetian G.B. Power Consumption Control of LEDs Considering Their Specific Characteristics and Ambient Temperature Variations. *Journal Computers and Electrical Engineering*. 2019. Vol. 77. P. 191–204. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2019.05.007
5. Mamchenko M.V., Romanova M.A. Approach to Remote Control and Detection of Degradation of LEDs in IoT Devices. *Proceedings of the 15th International Conference Management of Large-Scale System Development (MLSD)*. M.: IEEE. 2022. P. 716–721. DOI: 10.1109/MLSD55143.2022.9934462
6. Maltsev A.A., Maltsev I.A. Quality and Reliability Control of the LEDs by the Thermal Resistance of the p-n-Junction — Housing. *Journal Solid-State Lighting*. 2010. No 2. P.40–41. (In Russ.).
7. Goncharova Y.S., Romanova M.A., Smirnov S.V. Spectral Method of Non-Contact Temperature Measurement of Crystals of Semiconductor Light Sources. *Proceedings of TUSUR University*. 2015. No 2 (36). P. 38–40. (In Russ.).
8. Abdelmlek K.B., Araoud Z., Canale L., Nejma F.B., Charrada K., Zissis G. Thermal Management of LEDs Packages Within Inclined Enclosures for Lighting Applications. *2021 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)*. Vancouver, BC, Canada: IEEE. 2021. P. 1–6. DOI: 10.1109/IAS48185.2021.9677379
9. Hsu H., Wu S., Li J., Su J., Huang J., Fu S. Thermal Design for High Power Arrayed LED Heat-Dissipating System. *2013 8th Int. Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT)*. Taipei: IEEE. 2013. P. 222–225. DOI: 10.1109/IMPACT.2013.6706685
10. Purwanto E., Dupuis P., Canale L., Sinisuka N.I., Zissis G. Aging Study of Remote Luminophore at Ambient Temperature. *2019 IEEE Int. Conf. on Environ. and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)*. Genova: IEEE. 2019. P. 1–5. DOI: 10.1109/EEEIC.2019.8783248
11. Suleymanov S.R. Heating of phosphor in LED. *High Technologies in Modern Science and Technology (VTSNT-2016): Collection of Scientific Papers of the V International Scientific and Technical Conference of Young Scientists, Postgraduates and Students, Tomsk, 5–7 December 2016*. Tomsk: STT. 2016. P. 243–244. (In Russ.).
12. Yung K.C., Liem H., Choy H.S. Heat Transfer Analysis of a High-Brightness LED Array on PCB under Different Placement Configurations. *Journal International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2014. Vol. 53. P. 79–86. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.02.014

### Информация об авторе

**М.А. Романова**, научный сотрудник лаборатории киберфизических систем, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия.

### Information about the author

**M.A. Romanova**, Researcher at the Laboratory of Cyber-Physical Systems, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences RAS, Moscow, Russia.