

PhD Д. В. ПЕКУР, А. М. МІНЯЙЛО, І. В. ПЕКУР, чл.-кор. НАНУ, д. т. н. В. М. СОРОКІН

Україна, м. Київ, Інститут фізики напівпровідників імені В. Є. Лашкарьова НАН України
E-mail: demid.pekur@gmail.com

ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРНИХ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СВІТЛОДІОДНИХ МОДУЛІВ НА ЇХНІ ЕЛЕКТРООПТИЧНІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ПАРАМЕТРИ

Розглянуто вплив наявності у світлодіодному модулі відмінностей між температурами окремих світлодіодів на світловий потік та термін його служби. Визначено, що при оцінці ефективності та довговічності світлодіодних модулів необхідно враховувати стандартне відхилення температури світлодіодів від середнього значення. Продемонстровано, що при стандартному відхиленні температури на 20°C відносне зниження світлового потоку модуля може становити близько 1%, а кожне підвищення градієнта температури на 10°C — зменшити термін його служби більше ніж у три рази.

Ключові слова: світлодіодні модулі, електрооптичні параметри, температурні умови, нерівномірність температури, світлова ефективність, термін служби, тепловідведення.

Сучасні світлодіоди характеризуються високою енергоефективністю, що робить їх одними з найбільш перспективних джерел світла в багатьох галузях [1–3]. Світлодіоди часто об'єднують у світлодіодні модулі, які є ключовими компонентами нових освітлювальних систем, що забезпечують високу ефективність, стабільність і надійність роботи в різних сферах застосування — від побутового до автомобільного та промислового освітлення. Світлодіодні модулі складаються з одного або декількох світлодіодів [4, 5], розміщених на загальній підкладці з інтегрованими елементами тепловідведення, а часто і з додатковими компонентами, такими як резистори, що обмежують струм, оптичні елементи та системи керування. Такий підхід дозволяє рівномірно розподілити тепло, покращуючи тепловий режим роботи світлодіодів, знижуючи ризик перегріву та збільшуючи довговічність. Крім того, об'єднання світлодіодів у модуль дозволяє ефективніше керувати розподілом світла та досягати оптимальних оптичних характеристик.

Світлодіодні модулі можна інтегрувати в різні конструкції з покращеним тепловідведенням та оптимізованими оптичними характеристиками. Вони можуть бути розроблені для специфічних застосувань, забезпечуючи потрібний рівень яскравості, колірної температури та напрямку світлового потоку [6, 7]. Це робить їх надзвичайно гнучкими для використання в різноманітних умовах та середовищах.

Однак ефективність та довговічність світлодіодних модулів значною мірою залежать від температур-

них умов експлуатації світлодіодів [8–10], які в них використовуються. Підвищена температура може негативно впливати на електрооптичні параметри, такі як світловий потік та спектральні характеристики, а також прискорювати процеси деградації, що в них відбуваються [11–13]. При підвищеній температурі ефективність світлового випромінювання світлодіодів знижується через збільшення кількості безвипромінювальних рекомбінацій, що зменшує кількість фотонів, які випромінюються. Температура впливає і на спектр випромінювання та може призвести до зміни корельованої кольорової температури світлодіода, від якої залежить якість освітлення, крім того, це може бути вкрай небажаним у деяких застосуваннях, таких як, наприклад, медичне освітлення або художнє підсвічування [14–16].

За дослідженнями, зокрема [17, 18], підвищення температури на кожні 10°C знижує термін служби світлодіодів у e (тобто приблизно у 2,7) раз. Це питання ще більше загострюється при неоднаковій температурі окремих світлодіодів у світлодіодному модулі освітлювального приладу. У такому випадку загальний термін служби світлодіодного модуля оцінюється за температурою найбільш нагрітого світлодіода. Саме тому важливе не середнє значення температури всіх світлодіодів модуля, а температура найбільш нагрітого елемента, яка і визначає строк його служби.

Метою цієї роботи є дослідження впливу наявності у світлодіодному модулі відмінностей між температурами окремих світлодіодів на їхні експлуатаційні та електрооптичні параметри в аспектах зниження терміну служби, світлового потоку та світлової ефективності.

Роботу виконано за підтримки Національного фонду досліджень України в рамках грантового дослідницького проєкту №2022.01/0037.

Залежність терміну служби світлодіодів та їхньої світлової ефективності від температури

Термін служби світлодіодів суттєво залежить від їхньої робочої температури. Її підвищення призводить до прискорення деградаційних процесів у матеріалах світлодіода, що скорочує термін його служби. Ця залежність часто описується експоненційними або логарифмічними моделями, що базуються на фізичних принципах термічної активності.

Одним з поширених підходів для опису залежності терміну служби L від температури T є використання рівняння Арреніуса

$$L = L_0 \exp \left[-\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_0} + \frac{1}{T_e} \right) \right], \quad (1)$$

де L_0 — термін служби при температурі T_0 ;

E_a — енергія активації процесу деградації;

k — константа Больцмана, $k = 8,617 \cdot 10^{-5}$ еВ/К;

T_e — температура експлуатації.

Енергія активації деградації світлодіодів E_a відображає чутливість їхнього терміну служби до температури. Чим вище енергія активації, тим більшою мірою температура впливає на тривалість служби світлодіода. Значення енергії активації для світлодіодів видимого світла лежить в діапазоні від 0,6 еВ (червоні) до близько 0,9 еВ (сині). Враховуючи, що білі світлодіоди побудовані на основі синіх з використанням світлоконвертуючих матеріалів — люмінофорів, їхня енергія активації є подібною до синіх, але може бути трохи вищою через додаткові деградаційні процеси у люмінофорі.

Визначення абсолютного значення терміну служби є досить складною експериментальною задачею, на вирішення якої виробники світлодіодів часто витрачають сотні годин випробувань. Проте відношення терміну служби однотипних світлодіодів при експлуатації за різної температури відповідно до виразу (1) може бути описано простою залежністю

$$\frac{L_1}{L_2} = \exp \left[-\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \right], \quad (2)$$

де L_1, L_2 — термін служби світлодіодів за температурами T_1, T_2 відповідно.

Для кількісної оцінки впливу середньої температури та відхилень від неї на ефективність світлодіодного модуля можна використати залежність світлового потоку Φ від температури. Зазвичай ця залежність описується лінійною або експоненційною функцією. Для спрощення використаємо лінійну залежність

$$\Phi(T) = \Phi_0 [1 - \beta(T - T_0)], \quad (3)$$

де Φ_0 — світловий потік при температурі T_0 ;

β — температурний коефіцієнт зниження світлового потоку;

T — робоча температура світлодіода.

Температурний коефіцієнт β зазвичай лежить в діапазоні від 0,001 до 0,005 K^{-1} (що відповідає зниженню світлового потоку на 0,1–0,5% при підвищенні температури на один градус).

Для модуля, який складається зі світлодіодів з різною температурою T_i , можна знайти їхню середню температуру T_{av} , і відхилення від неї температури окремих світлодіодів: $\Delta T_i = T_i - T_{av}$. Якщо ці відхилення “симетричні”, загальний світловий потік залежить лише від середньої температури, і підвищення T_{av} зменшує світловий потік на величину, пропорційну $\beta(T_{av} - T_0)$.

В умовах нерівномірного розподілу температури, коли температура деяких світлодіодів істотно вища або нижча за T_{av} , вплив цих відхилень стає суттєвим. Для кількісної його оцінки часто використовують дисперсію σ^2 або стандартне відхилення σ температури. Проаналізувавши залежність (3) з використанням розкладення в ряд Тейлора та відкинувши незначні члени, отримаємо залежність, яка дозволяє визначити можливий вплив відхилень температури на загальний світловий потік. Для певної середньої температури значення світлового потоку Φ відносно Φ_0 , розрахованого за залежністю (3) з врахуванням можливого зниження, пов’язаного з наявністю дисперсії температури σ^2 , можна знайти як

$$\Phi_{rel} = \Phi / \Phi_0 \approx 1 - \beta^2 \sigma^2. \quad (4)$$

Світлова ефективність η розраховується як відношення світлового потоку до споживаної електричної потужності P :

$$\eta = \Phi / P. \quad (5)$$

Оскільки загальна споживана потужність модуля при зростанні температури залишається незмінною (або навіть трохи збільшується), зниження світлового потоку призводить до зменшення світлової ефективності світлодіодного модуля. Таким чином, нерівномірний розподіл температури, що спричинює зниження світлового потоку окремих світлодіодів, негативно впливає на загальну світлову ефективність світлодіодного модуля.

Вплив градієнта температури на термін служби світлодіодних модулів

У світлодіодному модулі джерела світла зазвичай використовуються світлодіоди одного типу, увімкнені послідовно, паралельно чи послідовно-паралельно, тому вихід одного з них призводить до необхідності заміни світлодіодного модуля в цілому, при тому що більшість світлодіодів залишаються придатними до подальшої експлуатації.

Для порівняння терміну служби найменш та найбільш нагрітих світлодіодів (L_1 та L_2 відповідно) вико-

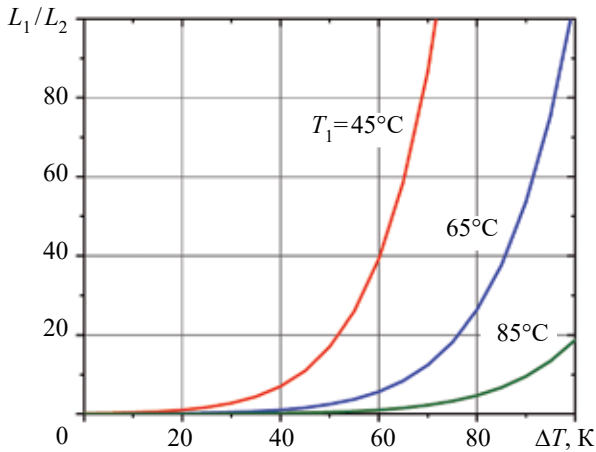


Рис. 1. Залежність співвідношення термінів служби найменш нагрітого світлодіода та найбільш нагрітого від різниці значень їхньої температури для $T_1 = \text{var}$

ристовувалася залежність (2). Моделювання виконувалося для білих світлодіодів, побудованих на основі синіх, при цьому незначне підвищення енергії активації в результаті наявності в них люмінофору не враховувалося. Відповідно, приймалося, що енергія активації дорівнює 0,9 еВ. На рис. 1 показано змодельовану залежність співвідношення величин терміну служби L_1/L_2 найменш та найбільш нагрітих світлодіодів від різниці значень їхньої температури ΔT для трьох варіантів температури найбільш нагрітого світлодіода T_1 .

З рис. 1 видно, що при значній різниці у температурі світлодіодів термін служби найменш нагрітих з них може бути значно більшим, ніж найбільш нагрітих: для розглянутих випадків кожне підвищення ΔT на 10°C знижує термін служби світлодіодів приблизно у 3,12 раза. При цьому, чим менше T_1 , тим швидше відбувається зростання L_1 , а значить, навіть невелике значення ΔT при низькій температурі експлуатації може суттєво скоротити термін служби світлодіода. Водночас слід зауважити, що це не є критичним, оскільки термін служби світлодіодів при низьких температурах є доволі великим (до 100 тис. годин при $T=45^\circ\text{C}$). При підвищенні робочої температури термін служби світлодіодів різко падає, що потребує особливої уваги при розробленні світлодіодних модулів, призначених для використання у критичних експлуатаційних умовах.

Варто ще звернути увагу на випадки, коли температура найменш нагрітих світлодіодів значно менша за стандартні робочі температури ($0-85^\circ\text{C}$). І хоча короточасні перебування при температурах нижче 0°C не є критичними, тривала робота за межами рекомендованого температурного діапазону підвищує ризик додаткової деградації матеріалу (наприклад, можуть появлятися мікротріщини у кристалі та шарі фотолюмінофора, виникати проблеми з контактами тощо). З часом це може додатково зменшити очікуваний ре-

сурс пристрою, вплинути на стабільність світлового потоку та додатково збільшити ймовірність відмов.

Вплив градієнта температури на загальну світлову ефективність світлодіодних модулів

Наявність різниці у температурі окремих світлодіодів модуля суттєво впливає і на його загальну ефективність. При підвищеній температурі ефективність світлового випромінювання світлодіодів знижується через збільшення частки безвипромінювальних рекомбінацій. Це означає, що більша частина спожитої енергії не перетворюється на світло, а розсіюється у вигляді тепла. У результаті зменшуються загальний світловий потік модуля та ефективність використання енергії.

Відповідно до формули (4), для різних значень температурного коефіцієнта зниження світлового потоку β були отримані залежності відносного світлового потоку Φ_{rel} світлодіодного модуля, середня температура світлодіодів якого має стандартне відхилення σ . На рис. 2 видно, що при $\sigma=20$ К зниження світлового потоку може складати 0,01 від початкового, тобто близько 1%. Зі збільшенням σ відбувається помітне зменшення Φ_{rel} , що свідчить про негативний вплив градієнта температури у світлодіодному модулі. До того ж, чим більше температурний

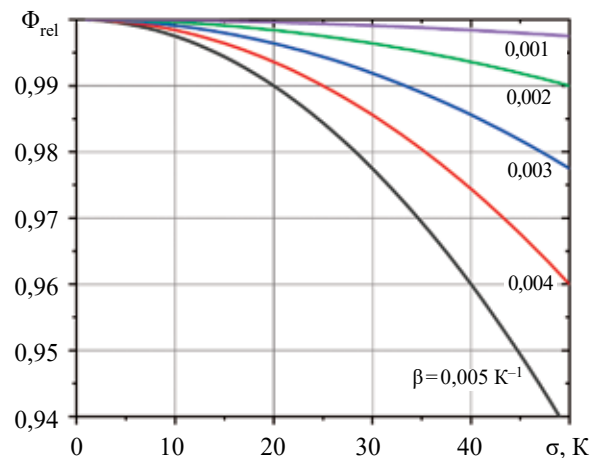


Рис. 2. Залежність відносного світлового потоку від стандартного відхилення температури світлодіодів для різних значень температурного коефіцієнта β (у K^{-1})

коефіцієнт β , тим стрімкіше знижується відносний світловий потік світлодіодів, що вказує на підвищення чутливості матеріалу до температурних коливань.

Висновки

Запропонований у роботі підхід до визначення впливу температурних умов роботи на експлуатаційні та електрооптичні параметри світлодіодних модулів з білих світлодіодів дозволив оцінити термін їхньої служби, світловий потік та світлову ефективність.

Залежність терміну служби світлодіодних модулів від різниці між температурами найбільш нагрітого світлодіода і найменш нагрітого показує, що зі

збільшенням температури експлуатації найбільш нагрітих світлодіодів (від 45°C до 85°C) термін служби модулів стає менш чутливим до цієї температурної різниці. Для розглянутих випадків кожне підвищення різниці температури на 10°C знижує термін служби світлодіодів приблизно у 3,12 раза. Однак навіть при меншій чутливості до різниці температур загальний термін служби світлодіодів при високих температурах експлуатації значно скорочується.

Для забезпечення ефективної роботи світлодіодних модулів необхідно зменшувати стандартне відхилення температури від середнього значення шляхом ефективного тепловідведення та покращення конструкції системи охолодження. Використання світлодіодів з нижчим значенням температурних коефіцієнтів також може знизити чутливість до температурних флуктуацій, підвищуючи загальний світловий потік та світлову ефективність світлодіодних освітлювальних пристроїв на їх основі.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

- Weisbuch C. Review — On the search for efficient solid state light emitters: past, present, future. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2020, vol. 9, no. 1, 016022. <https://doi.org/10.1149/2.0392001jss>
- Bhattarai T., Ebong A., Raja M. A review of light-emitting diodes and ultraviolet light-emitting diodes and their applications. *Photonics*, 2024, vol. 11, no. 6, 491. <https://doi.org/10.3390/photonics11060491>
- Пекур Д.В., Сорокін В.М. Стан і перспективи розвитку білих світлодіодів з випромінюванням, наближеним до природного. *Оптоелектроніка та напівпровідникова техніка*, 2023, вип. 58, с. 16–20. <https://doi.org/10.15407/іopt.2023.58.016>
- Barbosa J. L. F., Coimbra A. P., Simon D., Calixto W. P. Optimization process applied in the thermal and luminous design of high power LED luminaires. *Energies*, 2022, vol. 15, iss. 20, 7679. <https://doi.org/10.3390/en15207679>
- Różowicz A., Wachta H., Baran K. et al. Arrangement of LEDs and their impact on thermal operating conditions in high-power luminaires. *Energies*, 2022, vol. 15, iss. 21, 8142. <https://doi.org/10.3390/en15218142>
- Chincherо H. F., Alonso J. M., Hugo O. T. A review on smart LED lighting systems. *2020 IEEE Green Energy and Smart Systems Conference (IGESSC)*, Long Beach, CA, USA, 2020, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/igessc50231.2020.9285004>
- Taki T., Strassburg M. Review—Visible LEDs: more than efficient light. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2019, vol. 9, no. 1, 015017. <https://doi.org/10.1149/2.0402001jss>
- Tan L., Liu P., She C. et al. Research on heat dissipation of multi-chip LED filament package. *Micromachines*, 2021, vol. 13, iss. 1, 77. <https://doi.org/10.3390/mi13010077>
- Cengiz C., Azarifar M., Arik M. A critical review on the junction temperature measurement of light emitting diodes. *Micromachines*, 2022, vol. 13, iss. 10, 1615. <https://doi.org/10.3390/mi13101615>
- Li Y., Yang Y., Zheng H. et al. Review of high power phosphor-converted light-emitting diodes. *2019 16th China International Forum on Solid State Lighting & 2019 International Forum on Wide Bandgap Semiconductors China (SSLChina: IFWS)*, Shenzhen, China, 2019, pp. 111–115. <https://doi.org/10.1109/sslchinaifws49075.2019.9019776>
- Tan K.-Z., Lee S.-K., Low H.-C. LED Lifetime prediction under thermal-electrical stress. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 310–319. <https://doi.org/10.1109/tdmr.2021.3085579>
- Padmasali A. N., Kini S. G. Accelerated degradation test investigation for life-time performance analysis of LED luminaires. *IEEE Transactions on Components Packaging and Manufacturing Technology*, 2019, vol. 10, iss. 4, pp. 551–558. <https://doi.org/10.1109/tpmt.2019.2958852>
- Padmasali A. N., Kini S. G. A generalized methodology for predicting the lifetime performance of LED luminaire. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2020, vol. 67, iss. 7, pp. 2831–2836. <https://doi.org/10.1109/ted.2020.2996190>
- Luo W., Kramer R., Kompier M. et al. Effects of correlated color temperature of light on thermal comfort, thermophysiology and cognitive performance. *Building and Environment*, 2022, vol. 231, 109944. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109944>
- Beliakova I., Kostyk L., Maruschak P. et al. The temperature dependence of the parameters of LED light source control devices powered by pulsed voltage. *Applied Sciences*, 2024, vol. 14, iss. 13, 5678. <https://doi.org/10.3390/app14135678>
- Quispe M. R., Oscco F. M. A., Horn M. J., Gómez M. M. Influence of the temperature of a white LED on its lighting characteristics. *Journal of Physics Conference Series*, 2023, vol. 2538, 012009. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2538/1/012009>
- Peng D. S., Liu K. L. Effect of ambient temperature and heating time on high-power LED. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1777, 012033. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1777/1/012033>
- Yuan N. F., Pan N. K., Guo N. Y., Chen N. S. Study on thermal degradation of high power LEDs during high temperature and electrical aging. *2013 10th China International Forum on Solid State Lighting (ChinaSSL)*, Beijing, 2013, vol. 48, pp. 150–153. <https://doi.org/10.1109/sslchina.2013.7177336>

Дата надходження рукопису
до редакції 19.11 2024 р.

Опис статті для цитування:

Пекур Д. В., Міньяло А. М., Пекур І. В., Сорокін В. М. Вплив температурних умов експлуатації світлодіодних модулів на їхні електрооптичні та експлуатаційні параметри. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*, 2024, № 3–4, с. 37–41. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2024.3-4.37>

Cite the article as:

Peкур D. V., Minyaylo A. M., Peкур I. V., Sorokin V. M. The influence of operating temperature conditions of LED modules on their electro-optical and operational parameters. *Technology and design in electronic equipment*, 2024, no. 3–4, pp. 37–41. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2024.3-4.37>

THE INFLUENCE OF OPERATING TEMPERATURE CONDITIONS OF LED MODULES ON THEIR ELECTRO-OPTICAL AND OPERATIONAL PARAMETERS

Modern LEDs are characterised by high energy efficiency, which makes them one of the most promising light sources in many industries. The efficiency and durability of LED modules largely depend on the temperature conditions of operation. Elevated temperatures can adversely affect electro-optical parameters such as luminous flux and spectral characteristics, as well as accelerate degradation processes. This article investigates the effect of temperature conditions of LED modules on their electro-optical and operational parameters. The paper considers how temperature unevenness in the LED module affects their luminous flux and service life. It is determined that when assessing the efficiency and durability of LED modules, it is necessary to take into account the standard deviation of the LED temperature from the average. Given the presence of temperature gradient between LEDs in a LED module, the service life of the latter is estimated by the temperature of the most heated LED, as shown in this paper. The influence of the deviation of the LED temperature from the average on the overall luminous efficiency of LED modules based on them is demonstrated. In particular, with a standard temperature deviation of 20°C, the relative decrease in the module's luminous flux can be about 1%. For the considered cases, an increase in temperature unevenness by 10°C reduces the lifetime of the LEDs more than three times. To ensure the efficient operation of LED modules, it is necessary to reduce the standard deviation of temperature from the mean value through effective heat dissipation and improved cooling system design. The use of LEDs with lower temperature coefficients can also reduce the sensitivity to temperature fluctuations, increasing the overall luminous flux and luminous efficiency of LED lighting devices based on them.

Keywords: LED modules, electro-optical parameters, temperature conditions, temperature unevenness, luminous efficiency, service life, heat dissipation.

REFERENCES

1. Weisbuch C. Review — On the search for efficient solid state light emitters: past, present, future. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2020, vol. 9, no. 1, 016022. <https://doi.org/10.1149/2.0392001jss>
2. Bhattarai T., Ebong A., Raja M. A review of light-emitting diodes and ultraviolet light-emitting diodes and their applications. *Photonics*, 2024, vol. 11, no. 6, 491. <https://doi.org/10.3390/photonics11060491>
3. Pekur D.V., Sorokin V.M. State of the art and prospects for the evolution of white LEDs with near natural light emission. *Optoelectronics and Semiconductor Technique*, 2023, vol. 58, pp. 16–20. <https://doi.org/10.15407/ipt.2023.58.016> (Ukr)
4. Barbosa J. L. F., Coimbra A. P., Simon D., Calixto W. P. Optimization process applied in the thermal and luminous design of high power LED luminaires. *Energies*, 2022, vol. 15, iss. 20, 7679. <https://doi.org/10.3390/en15207679>
5. Róźowicz A., Wachta H., Baran K. et al. Arrangement of LEDs and their impact on thermal operating conditions in high-power luminaires. *Energies*, 2022, vol. 15, iss. 21, 8142. <https://doi.org/10.3390/en15218142>
6. Chinchero H. F., Alonso J. M., Hugo O. T. A review on smart LED lighting systems. *2020 IEEE Green Energy and Smart Systems Conference (IGESSC)*, Long Beach, CA, USA, 2020, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/igessc50231.2020.9285004>
7. Taki T., Strassburg M. Review—Visible LEDs: more than efficient light. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2019, vol. 9, no. 1, 015017. <https://doi.org/10.1149/2.0402001jss>
8. Tan L., Liu P., She C. et al. Research on heat dissipation of multi-chip LED filament package. *Micromachines*, 2021, vol. 13, iss. 1, 77. <https://doi.org/10.3390/mi13010077>
9. Cengiz C., Azarifar M., Arik M. A critical review on the junction temperature measurement of light emitting diodes. *Micromachines*, 2022, vol. 13, iss. 10, 1615. <https://doi.org/10.3390/mi13101615>
10. Li Y., Yang Y., Zheng H. et al. Review of high power phosphor-converted light-emitting diodes. *2019 16th China International Forum on Solid State Lighting & 2019 International Forum on Wide Bandgap Semiconductors China (SSLChina: IFWS)*, Shenzhen, China, 2019, pp.111–115. <https://doi.org/10.1109/sslchinaifws49075.2019.9019776>
11. Tan K.-Z., Lee S.-K., Low H.-C. LED Lifetime prediction under thermal-electrical stress. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 310–319. <https://doi.org/10.1109/tdmr.2021.3085579>
12. Padmasali A. N., Kini S. G. Accelerated degradation test investigation for life-time performance analysis of LED luminaires. *IEEE Transactions on Components Packaging and Manufacturing Technology*, 2019, vol. 10, iss. 4, pp. 551–558. <https://doi.org/10.1109/tcpmt.2019.2958852>
13. Padmasali A. N., Kini S. G. A generalized methodology for predicting the lifetime performance of LED luminaire. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2020, vol. 67, iss. 7, pp. 2831–2836. <https://doi.org/10.1109/ted.2020.2996190>
14. Luo W., Kramer R., Kompier M. et al. Effects of correlated color temperature of light on thermal comfort, thermophysiology and cognitive performance. *Building and Environment*, 2022, vol. 231, 109944. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109944>
15. Beliakova I., Kostyk L., Maruschak P. et al. The temperature dependence of the parameters of LED light source control devices powered by pulsed voltage. *Applied Sciences*, 2024, vol. 14, iss. 13, 5678. <https://doi.org/10.3390/app14135678>
16. Quispe M. R., Oscco F. M. A., Horn M. J., Gómez M. M. Influence of the temperature of a white LED on its lighting characteristics. *Journal of Physics Conference Series*, 2023, vol. 2538, 012009. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2538/1/012009>
17. Peng D. S., Liu K. L. Effect of ambient temperature and heating time on high-power LED. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1777, 012033. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1777/1/012033>
18. Yuan N. F., Pan N. K., Guo N. Y., Chen N. S. Study on thermal degradation of high power LEDs during high temperature and electrical aging. *2013 10th China International Forum on Solid State Lighting (ChinaSSL)*, Beijing, 2013, vol. 48, pp. 150–153. <https://doi.org/10.1109/sslchina.2013.7177336>