

**І.В. Пекур, Д.В. Пекур**

## **СПЕКТРАЛЬНІ ПАРАМЕТРИ КВАЗІМОНОХРОМАТИЧНИХ СВІТЛОДІОДІВ ДЛЯ СИСТЕМ ОСВІТЛЕННЯ З РЕГУЛЬОВАНИМ СПЕКТРАЛЬНИМ СКЛАДОМ**

В роботі розглянуто вплив на параметри синтезованого світла повної ширини на рівні половини висоти спектрів додаткових квазімонохроматичних світлодіодів для світлодіодних кластерів з регульованою корельованою колірною температурою, побудованих на основі комбінації білих широкосмугових потужних світлодіодів та квазімонохроматичних світлодіодів з піковими довжинами хвиль 474 та 600 нм. Було показано, що при побудові світлодіодних кластерів з регульованою CCT з підвищенням повної ширини на рівні половини висоти спектра квазімонохроматичних світлодіодів підвищується CIE Ra результуючого випромінювання. В той же час, більший вплив на зміну CCT результуючого світла чинить спектр квазімонохроматичних світлодіодів з меншою повною шириною на рівні половини висоти спектра, а отже, внесок світлового потоку таких світлодіодів в результуюче випромінювання буде меншим. Враховуючи, що від параметрів джерел світла, використаних для створення світлового середовища, в якому перебуває людина, залежить секреція гормонів мелатоніну та кортизолу, які в значній мірі впливають на самопочуття та психофізіологічний стан людини, стає все більш розповсюдженою побудова освітлювальних систем з регульованою корельованою колірною температурою. В той же час досягнення високої світлової ефективності сучасних світлодіодних освітлювальних систем часто негативно впливає на якісні параметри світлового середовища, яке ними створюється. Невідповідність спектрального складу світла потребам людини в певний час доби може негативно вплинути на природні цикли біоритмів людини. Результати роботи сприяють розвитку подальших досліджень в напрямку пошуку нових шляхів побудови сучасних потужних енергоефективних світлодіодних систем освітлення.

**Ключові слова:** квазімонохроматичний світлодіод, пікова довжина хвилі, корельована колірна температура, індекс кольоропередачі, денне світло.

### **1. ВСТУП**

Світлова ефективність сучасних білих світлодіодів наближається до своїх фізичних меж. Підвищення світлової ефективності стало можливим за рахунок удосконалення технології виробництва синіх світлодіодів та використання люмінофорів з високою спектральною ефективністю та квантовим виходом для перетворення синього світла в широкосмуговий спектр, який використовується в білих світлодіодах. За останні 10 років спостерігається значне підвищення світлової ефективності[1] білих світлодіодів. В той же час прагнення досягнути високої світлової ефективності часто негативно впливає на інші параметри світлодіодних джерел світла[2].

Від спектра та інтенсивності джерел світла, що використовуються для створення середовища, в якому перебуває людина, залежить секреція гормонів мелатоніну та кортизолу, які в значній мірі впливають на самопочуття та психофізіологічний стан людини. В природному середовищі (при відсутності штучних джерел світла) в організмі людини з початком сутінок рівень мелатоніну поступово зростає вночі, а потім поступово зменшується, досягаючи на світанку денного рівня [3, 4]. При значних порушеннях зміни природних циклів спектрального складу освітлення системами штучного освітлення виникає десинхронізація біоритмів людини, що призводить до порушення сну, надмірного емоційного напруження та зниження ефективності роботи, а з часом і до хронічних захворювань [5, 6]. Слід зазначити, що важливим для комфортного самопочуття людини є періодичне перебування при яскравому денному світлі або при штучному освітленні, яке максимально наближене до нього.

Міжнародна комісія з освітлення (Commission internationale de l'éclairage, CIE) визначила узгоджені методи кількісної оцінки якості світла, що визначає здатність освітлення передавати колір, близький до кольору об'єктів, освітлених ідеальним або природним джерелом світла. Найбільш розповсюдженим параметром, який характеризує наближеність світла до природного чи денного, є індекс кольоропередачі (CIE Ra) [7].

Визначення CIE Ra базується на зміщенні координат кольоровості тестових еталонних кольорових зразків, освітлених досліджуваним джерелом світла в порівнянні з освітленими еталонним джерелом світла. Максимальне значення CIE Ra 100 досягаються при відсутності відмінностей у відтворенні кольору еталонних кольорових зразків.

Створення високих рівнів освітленості передбачає використання освітлювальних систем високої потужності. В останній час для створення потужних світлодіодних освітлювальних приладів використовуються світлодіоди високої потужності та світлодіодні COB (Chip on board) модулі [8]. При створенні освітлювальних приладів, потужність яких вища за потужності окремих світлодіодів, або за потреби у реалізації регулювання спектрального складу результуючого світла, світлодіоди та світлодіодні COB модулі збираються у світлодіодні кластери. Світлодіодні кластери можуть включати світлодіоди з різними спектральними характеристиками з можливістю керування потужністю випромінювання окремих світлодіодів чи їхніх груп.

Особливі складнощі у забезпеченні високих рівнів CIE Ra виникають при побудові світлодіодних систем освітлення з регульованою колірною температурою, які здатні змінювати спектральний склад світла відповідно до потреб людини у визначений час. В таких системах використовуються світлодіодні кластери, побудовані на основі двох, трьох, чотирьох або п'яти типів світлодіодів [10], що дає можливість змінювати спектральний склад синтезованого світла за рахунок зміни інтенсивності випромінювання окремих типів світлодіодів. Найбільш розповсюджені світлодіодні кластери складаються з червоно-зелено-синіх (RGB) світлодіодів, що дає можливість синтезувати світло в широкому діапазоні зміни CCT, проте з відносно низькими значеннями CIE Ra. Для підвищення CIE Ra та світлової ефективності світлодіодні кластери можуть включати чотири типи світлодіодів, наприклад RGBx, де "x" може означати "A" (бурштин), "Y" (жовтий) або "W" (білий).

В деяких випадках системи з регульованою корельованою колірною температурою (Correlated Color Temperature, CCT) можуть бути реалізовані на основі світлодіодів тільки трьох типів: білого та двох додаткових квазімонохроматичних. В роботі [11] було визначено оптимальні пікові довжини хвиль (peak wavelength, PW) квазімонохроматичних світлодіодів (474 та 600 нм) для світлодіодних кластерів з регульованою CCT, здатні забезпечити найбільший діапазон її регулювання - від 3098 К до 6700 К. В той же час найбільш прийнятним для людини є зміна CCT в діапазоні від 3000 К до 6000 К. Проведені в роботі розрахунки були виконані з використанням спектра білого світлодіода [12] та спектрів квазімонохроматичних світлодіодів, отриманих на основі експериментальних даних. В роботі залишився невизначеним вплив повної ширини на рівні половини висоти (full width at half maximum, FWHM) спектра додаткових квазімонохроматичних світлодіодів на результуючі параметри синтезованого світла.

Метою даної роботи є визначення впливу на параметри синтезованого світла FWHM додаткових квазімонохроматичних світлодіодів для світлодіодних джерел світла з регульованою CCT, побудованих на основі комбінації білих широкосмугових потужних світлодіодів та світлодіодів з піковими довжинами хвиль 474 і 600 нм.

## **2. ВИЗНАЧЕННЯ СПЕКТРАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ СИНТЕЗОВАНОГО СВІТЛА**

При синтезі спектрального складу світла з використанням квазімонохроматичних світлодіодів для підвищення CCT доцільно використовувати квазімонохроматичні

світлодіоди з короткохвильової області, а для зниження – з довгохвильової [11]. При одночасному використанні базового(білого) та одного додаткового світлодіода (з червоної чи синьої області спектра), координати колірності результуючого світла зміщуються по прямій на колірній діаграмі CIE(1937) (рис. 1), що з'єднує координати колірності цих світлодіодів (прямі BW та WR).

Для коректного розрахунку CIE Ra синтезованого світла координати колірності спектра світла мають бути локалізовані від кривої Планка на відстані не більше, ніж 0,006 (параметр Delta u, v або Duv). Тому при аналізі результатів доцільно враховувати значення параметра Duv як такого, що визначає синтезований спектр як білий.

В даній роботі за базовий було обрано білий світлодіод CMA2550 з CCT близько 4000 K, виконаний у вигляді COB модуля з високим рівнем CIE Ra (вище 90). Спектри додаткових світлодіодів були розраховані для визначених PW 474 та 600 нм при FWHM спектра в діапазоні від 1 до 50 нм. Синтез результуючого спектра ( $P_{\lambda}(\lambda)$ ) на основі визначених спектрів світлодіодів проводиться сумуванням їхніх інтенсивностей за всіма довжинами хвиль:

$$P_{\lambda}(\lambda) = k_1 P_{1\lambda}(\lambda) + k_2 P_{2\lambda}(\lambda), \quad (1)$$

де  $k_1$  та  $k_2$  - коефіцієнти, що визначають внесок випромінювання у результуючому світлі спектрів світлодіодів з спектральними розподілами  $P_{1\lambda}(\lambda)$  та  $P_{2\lambda}(\lambda)$  відповідно. При цьому приймалося, що:

$$k_1 + k_2 = 1. \quad (2)$$

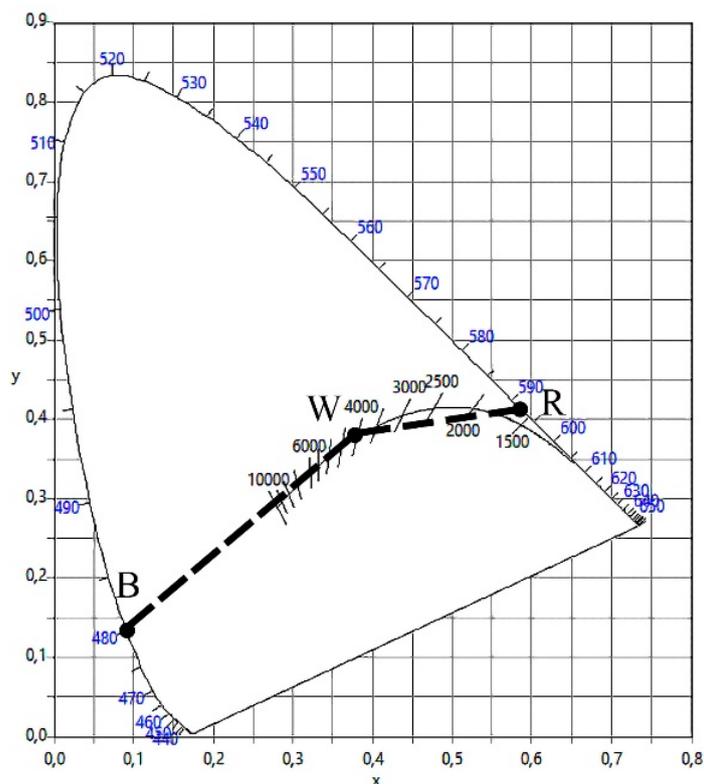


Рис. 1. Діаграма кольоровості CIE(1937) [13] x, y, з координатами колірності світлодіодів R, B та W і приклад отримання світла на планківському локусі (LS) при синтезі світла з використанням RW та BW компонент.

Для розрахунків спектрів квазімонохроматичних світлодіодів з визначеною PW та FWHM була використана залежність:

$$S_{LED}(\lambda, \lambda_0, \lambda_{0,5}) = \frac{g(\lambda, \lambda_0, \lambda_{0,5}) + 2g^5(\lambda, \lambda_0, \lambda_{0,5})}{3}, \quad (3)$$

$$g(\lambda, \lambda_0, \lambda_{0,5}) = \exp\left\{-\left[\frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta\lambda_{0,5}}\right]^2\right\} \quad (4)$$

де  $g$  – інтенсивність випромінювання при довжині хвилі;  $\lambda_0$  - пікова довжина хвилі спектра випромінювання;  $\lambda_{0,5}$  - повна ширина на рівні половини висоти спектра випромінювання [14]. Чисельно розраховані за даною методикою спектри досить точно відповідають спектрам, визначеним в роботі [11] експериментально.

Для аналізу параметрів синтезованих спектрів було розроблено програмне забезпечення, яке на основі використання залежностей (1-4) дозволило синтезувати спектри додаткових світлодіодів та результуючого світла з визначеними частинами базового та додаткового світлового випромінювання. Розроблене програмне забезпечення було створено на основі використання пакету Python LuxPy [42], який дозволяє отримати вичерпну інформацію про спектральні параметри синтезованого світла. В програмному пакеті LuxPy для визначення CCT та Duv використано методи Yoshi Ohno[16], а визначення CRI здійснюється відповідно до загальноприйнятих стандартів та методів [7].

### 3. ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

При використанні спектра базового білого світлодіода з доданим синтезованим спектром квазімонохроматичного світлодіода здійснювався синтез спектра результуючого світла. Враховуючи результати роботи [11], а саме: внесок додаткових квазімонохроматичних світлодіодів з піковою довжиною хвилі 474 нм становив до 10% загального світлового потоку, а світлодіодів з піковою довжиною хвилі 600 нм - до 20%. При проведенні розрахунків було визначено залежність CCT та CIE Ra від FWHM спектра квазімонохроматичних світлодіодів в діапазоні її зміни від 1 до 50 нм (рис. 2 та 3) відповідно. Слід зазначити, що частина результатів не задовольнила критерій Duv менше 0,006 і тому ці результати не представлені на рисунку і не розглядаються.

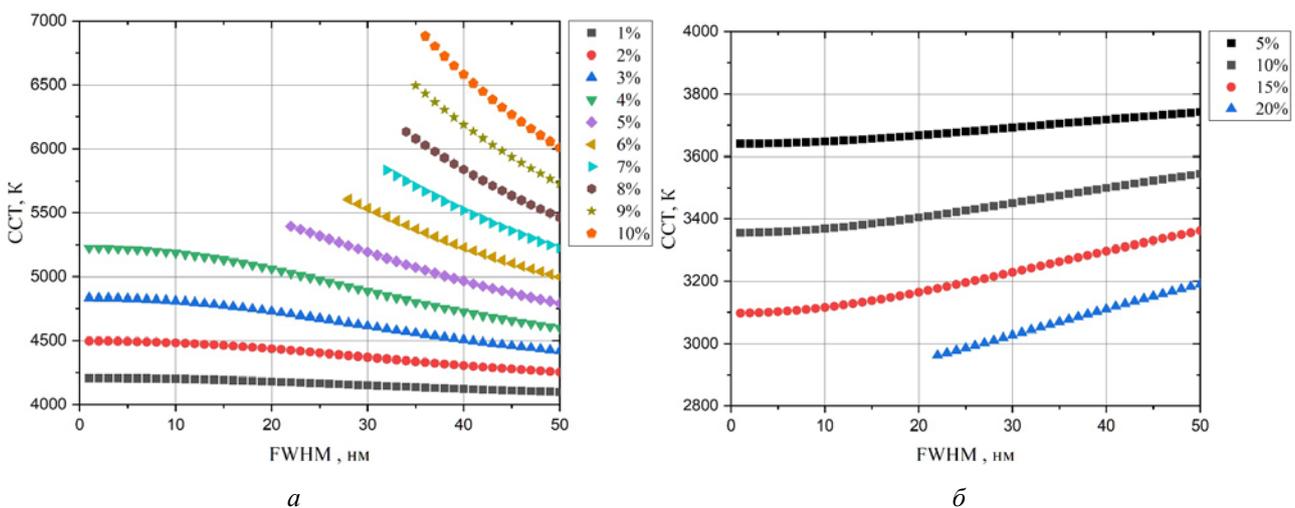


Рис. 2. Залежність CCT результуючого світла від півширини випромінювання додаткових квазімонохроматичних світлодіодів з PW 474 нм (а) та 600 нм (б) в результуючому випромінюванні при їхніх різних внесках в результуюче світло.

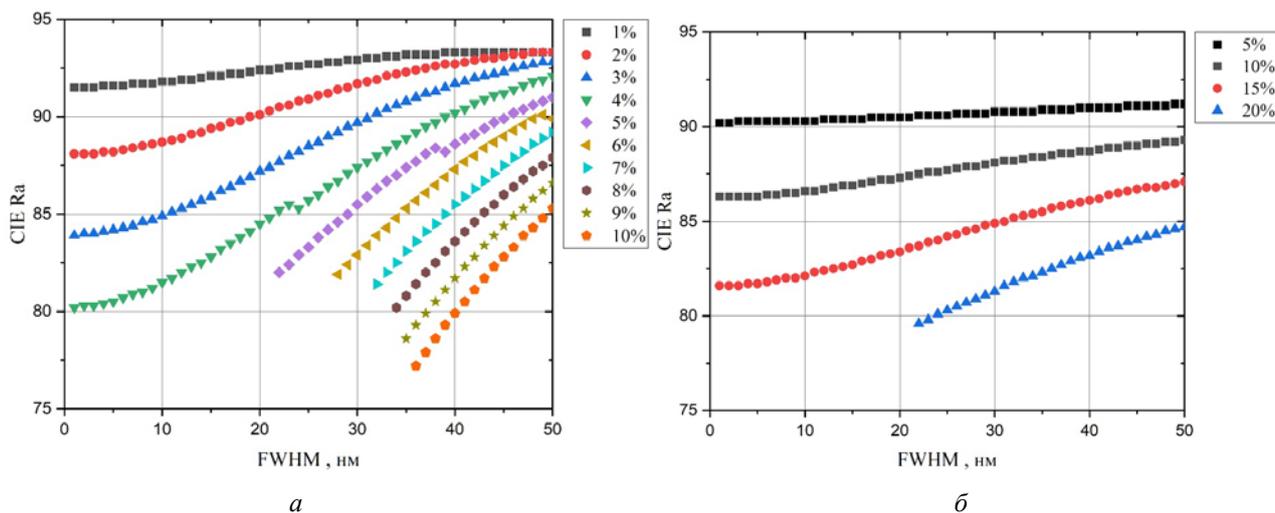


Рис. 3. Залежність CIE Ra результуючого світла від FWHM додаткових квазімонохроматичних світлодіодів з PW 474 нм (а) та 600 нм (б) в результуючому випромінюванні при їхніх різних внесках в результуюче світло.

Як показано на рис. 3, при зменшенні FWHM спектра квазімонохроматичних світлодіодів з піковими довжинами хвиль 474 нм та 600 нм, внесок додаткової квазімонохроматичної складової може бути меншим при забезпеченні більш широкого діапазону зміни CCT. При цьому для реалізації можливості підвищення CCT до 6000 К потрібно вибрати квазімонохроматичний світлодіод з піковою довжиною хвилі 474 нм та FWHM спектра не більше 36 нм, а для зменшення CCT до 3000 К – квазімонохроматичний світлодіод з піковою довжиною хвилі 600 нм та FWHM не більше 27 нм.

Залежність CIE Ra результуючого світла від FWHM спектра додаткових квазімонохроматичних світлодіодів, показана на рис. 3, вказує на те, що збільшення FWHM дозволяє підвищити CIE Ra результуючого світла при однаковому внеску додаткової квазімонохроматичної складової.

#### 4. ВИСНОВКИ

На основі проведеного аналізу встановлено, що при використанні додаткових квазімонохроматичних світлодіодів з піковими довжинами хвиль 474 та 600 нм у поєднанні з базовим білим світлодіодним COB модулем типу CMA 2550 компанії Cree (4000K), при побудові світлодіодних кластерів з регульованою CCT з підвищенням повної ширини на рівні половини висоти спектра квазімонохроматичних світлодіодів, підвищується CIE Ra результуючого випромінювання. В той же час, більший вплив на зміну CCT результуючого світла чинить спектр квазімонохроматичних світлодіодів з меншою повною шириною на рівні половини висоти спектра, а отже, внесок світлового потоку таких світлодіодів в результуюче випромінювання буде меншим.

В системах з регульованою CCT в діапазоні від 3000 до 6000K при використанні додаткових квазімонохроматичних світлодіодів з піковою довжиною хвилі 474 нм та 600 нм доцільно використовувати світлодіоди з повною шириною на рівні половини висоти спектра не більше 36 нм та 27 нм відповідно.

Використання квазімонохроматичних світлодіодів (474 нм з FWHM спектра 36 нм та 600 нм з FWHM спектра 27 нм) дозволяє створити систему з можливістю зміни CCT в діапазоні від 3000 К до 6000 К при забезпеченні CIE Ra понад 80 з використанням світлодіодів всього 3 типів (базового білого та двох додаткових квазімонохроматичних).

Напрямом подальших досліджень може бути пошук комбінацій спектрів квазімонохроматичних світлодіодів, здатних забезпечити високий рівень CIE Ra при широкому діапазоні зміни CCT.

**I.V. Pekur, D.V. Pekur**

### **SPECTRAL PARAMETERS OF QUASI-MONOCHROMATIC LEDs FOR LIGHTING SYSTEMS WITH TUNABLE SPECTRAL COMPOSITION**

In this paper, the influence on the parameters of the synthesized light of the full width at the half-height level of the spectra of additional quasi-monochromatic LEDs for LED clusters with adjustable correlated color temperature built on the basis of a combination of white broadband high-power LEDs and quasi-monochromatic LEDs with peak wavelengths of 474 and 600 nm is considered. It was shown that the construction of LED clusters with adjustable CCT with an increase in the full width at half the height of the spectrum of quasi-monochromatic LEDs increases the CIE Ra of the resulting radiation. At the same time, the spectrum of quasi-monochromatic LEDs with a smaller full width at half the height of the spectrum has a greater influence on the change in the CCT of the resulting light, and therefore the contribution of the luminous flux of such LEDs to the resulting radiation will be less. Given that the parameters of the light sources used to create the light environment in which a person is, depends on the secretion of the hormones melatonin and cortisol, which significantly affect the well-being and psychophysiological state of a person, it is becoming increasingly common to build lighting systems with adjustable correlated color temperature. At the same time, achieving high luminous efficiency of modern LED lighting systems often negatively affects the quality parameters of the light environment they create. Non-compliance of the spectral composition of light with human needs at a certain time of day can adversely affect the natural cycles of human biorhythms. The results of the work contribute to the development of further research in the direction of finding new ways to build modern powerful energy-efficient LED lighting systems.

**Keywords:** quasi-monochromatic LED, peak wavelength, correlated color temperature, color rendering index, daylight.

1. Baten, M.Z., Alam, S., Sikder, B., Aziz, A. III-Nitride Light-Emitting Devices. *Photonics*. 2021. **8**, 430. <https://doi.org/10.3390/photonics8100430>
2. T. W. Murphy, Maximum spectral luminous efficacy of white light, *Journal of Applied Physics*. May 2012. **111**, №10, P. 104909. doi: 10.1063/1.4721897.
3. Von Gall Charlotte. The Effects of Light and the Circadian System on Rhythmic Brain Function. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022. **23**, № 5. Article № 2778. <https://doi.org/10.3390/ijms23052778>
4. Pandi-Perumal, S. R., Cardinali, D. P., Zaki, N. F. W., Karthikeyan, R., Spence, D. W., Reiter, R. J., Brown, G. M. Timing is everything: Circadian rhythms and their role in the control of sleep. *Frontiers in Neuroendocrinology*. 2022. **66**. Article № 100978. <https://doi.org/10.1016/j.yfrne.2022.100978>.
5. Al-Naggar R. A., Anil S. Artificial light at night and cancer: Global study. *Asian Pacific Journal of Cancer Prevention*. 2016. **17**, № 10. P. 4661–4664. <https://doi.org/10.7314/APJCP.2016.17.10.4661>.
6. Svechkina A., Portnov B.A., Trop T. The impact of artificial light at night on human and ecosystem health: a systematic literature review. *Landscape Ecol*. 2020. **35**. P. 1725–1742. <https://doi.org/10.1007/s10980-020-01053-1>
7. CIE13.3-1995. 1995. Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources. Vienna (Austria): CIE.
8. Lishik S.I., Posedko V.S., Trofimov Yu.V., Tsvirko V.I. Current state, trends and prospectives of the development of light emitting diode technology. *Light & Eng*. 2017. **25**. P. 13–24.
9. Minhao Zhang, Yu Chen, Guoxing He, Color Temperature Tunable White-Light LED Cluster with Extrahigh Color Rendering Index. *The Scientific World Journal*. 2014. Article № 897960. <https://doi.org/10.1155/2014/897960>.

10. Zhan X., Wang W., Chung H. A novel color control method for multi-color LED systems to achieve high color rendering indexes. *IEEE Trans. Power Electron.* 2018. **33**, № 10. P. 8246-8258. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2785307>.
11. D.V. Pekur, V.M. Sorokin, Yu.E. Nikolaenko, I.V. Pekur, M.A. Minyaylo. Determination of optical parameters in quasi-monochromatic LEDs for implementation of lighting systems with tunable correlated color temperature. *SPQEO*. 2022. **25**. №3. P. 303-314. DOI: 10.15407/spqeo25.03.303.
12. Cree Inc. <https://cree-led.com/media/documents/ds-CMA2550.pdf> (reference date: 08.02.22).
13. Smith Thomas; Guild John. The C.I.E. colorimetric standards and their use. *Transactions of the Optical Society*. 1931–32. **33**, № 3. P. 73–134. <https://doi.org/10.1088/1475-4878/33/3/301>.
14. Ohno Y. 2005. Spectral design considerations for white LED color rendering. *Opt Eng.* 44:111302.
15. Kevin A. G. Smet. Tutorial: The LuxPy Python Toolbox for Lighting and Color Science, *LEUKOS*. 2020. **16**, № 3. P. 179-201. <https://doi.org/10.1080/15502724.2018.1518717>.
16. Ohno Y. Practical use and calculation of CCT and Duv. *LEUKOS*. 2014. **10**, № 1. P. 47–55. <https://doi.org/10.1080/15502724.2014.839020>.

Інститут фізики напівпровідників  
ім. В.Є. Лашкарьова НАН України  
41, проспект Науки,  
03680 Київ, Україна

Отримано 17.08.2022