

Porównanie modelowanych oraz rzeczywistych wartości parametrów świetlnych i kolorymetrycznych białych diod LED pracujących w szerokim zakresie temperatur

Streszczenie. Z powodu czasochłonności oraz kosztochłonności, jakiej wymaga przeprowadzanie pomiarów rozkładów widmowych (SPD) LED-ów pracujących w różnych temperaturach, pożądanym jest możliwość zamodelowania tych pomiarów w szerokim zakresie temperatur pracy. Bazując na modelowaniu SPD białych LED-ów metodą superpozycji Gaussa przeprowadzono analizę dokładności tej metody w wyznaczaniu ich parametrów fotometrycznych oraz kolorymetrycznych dla różnych temperatur pracy. Wykazano, że wartości parametrów świetlnych dla rozkładu zmierzzonego oraz odtworzonego tym modelem są zgodne.

Abstract. Because of the time- and cost- intensive nature of making spectral distribution (SPD) measurements of LEDs operating at different temperatures, it is desirable to be able to model these measurements over a wide range of operating temperatures. Based on the SPD modeling of white LEDs by the Gauss superposition method, an analysis of the accuracy of this method in determining their photometric and colorimetric parameters for different operating temperatures was conducted. It was shown that the values of light parameters for the distribution measured and modeled by this model are consistent. **(The real and modeled values of photometric and colorimetric parameters comparison of white LEDs operating at wide temperature range).**

Słowa kluczowe: źródła LED światła białego, rozkłady widmowe (SPD), model Superpozycji Gaussa, metryki dopasowania.

Keywords: white light LED sources, spectral distributions (SPD), Gaussian superposition model, matching metrics.

Wstęp

Współcześnie niezależnie czy to w oświetleniu specjalistycznym, czy domowym, najczęściej wykorzystywanymi źródłami światła białego są LEDy [1]. Uzyskanie światła białego w półprzewodnikowych źródłach światła możliwym jest przy użyciu różnych technologii. W literaturze [2÷4] przedstawiona została metoda opierająca się na addatywnym mieszaniu światła pochodzącego od diod LED o barwie czerwonej, zielonej, oraz niebieskiej. Inną metodą pozwalającą na uzyskanie światła białego [5÷6], jest wykorzystanie diody UV, która pokryta zostaje luminoforem składającym się z trzech warstw, których wzbudzenie pozwala na uzyskanie emisji światła o barwie czerwonej, zielonej oraz niebieskiej. Światło białe jest skutkiem mieszania wymienionych powyżej barw. Jednakże najczęściej wykorzystywanym rozwiązaniem jest to polegające na mieszaniu światła emitowanego przez niebieską diodę LED oraz żółtego emitowanego przez wzbudzony tą diodą luminofor [7÷9].

Mnogość LEDów emitujących białe światło dostępnych w sprzedaży wymaga na producentach dokładne informowanie użytkownika o ich parametrach technicznych, w tym świetlnych i kolorymetrycznych. Dokonanie opisu źródła światła LED można dokonać bazując na następujących parametrach opisanych w literaturze [10÷25]:

- strumień świetlny Φ [lm];
- rozkład światłości [cd/klm];
- użyteczny kąt rozsyłu światłości [°];
- rozkład luminancji na powierzchni [cd/m²];
- temperatura barwowa najbliższa (CCT) [K];
- wskaźnik oddawania barw R_a [-];
- wskaźnik wierności barw R_f [-];
- współrzędne punktu chromatyczności w układzie CIE1931 (x, y) lub CIE1976 (u', v');
- skuteczność świetlna promieniowania (LER);
- wartość parametru D_{uv} [-].

Należy jednak podkreślić, że wymienione parametry przedstawione są przez producentów dla temperatury znamionowej pracy danego źródła LED [26]. Zmiana temperatury pracy wpływa na wartość wymienionych

parametrów [16,27÷29], ponieważ maksimum mocy promienistej rozkładu widmowego (SPD) źródeł LED wraz ze wzrostem temperatury przesuwa się w stronę fal dłużych [30÷32]. Ten efekt został zaobserwowany niezależnie przez różnych badaczy co zostało obszernie opisane w artykule [32] „Temperature dependence of the color rendering index of a phosphor-conversion white light-emitting diode” gdzie przedstawione zostały wyniki pomiarów rozkładów widmowych (SPD) białego LEDa w zakresie od 20°C do 80°C, ze zmiennym krokiem wynoszącym 20°C. Także, potwierdzają ten fakt dane zaprezentowane w artykule [16] „White LED performance analyzed under their different working conditions” gdzie przedstawiono pomiary względnego rozkładu widmowego białego LEDa dla pełnego zakresu temperatur jego pracy, od -30°C do 50°C. Obszerne badania tego zjawiska przedstawione zostały przez autorów artykułu [31] „Influence of junction temperature on chromaticity and color-rendering properties of trichromatic white-light sources based on light-emitting diodes”. W pracy tej opisano przesunięcie wartości długości fali dla jakiej przypada pik widma niebieskiej diody LED GaInN w badaniach przeprowadzonych dla temperatur z zakresu od ok. 20°C do 120°C ze zmiennym krokiem 20°C oraz wartości natężenia prądu od 10mA do 100 mA, ze zmiennym krokiem 10 mA. Na podstawie danych zamieszczonych w artykule [31] można wywnioskować, że wartość długości fali dla jakiej przypada pik widma dla 20°C przy natężeniu prądu wynoszącym 10 mA zwiększa się o ok. 3,75 nm dla 120°C.

Rozwiązaniem pozwalającym na dokonanie określenia parametrów świetlnych i kolorymetrycznych rozkładów widmowych mocy promienistej (SPD) dla szerszych zakresów temperatury pracy może stanowić bazowanie na modelach matematycznych, dzięki którym możliwe jest zamodelowanie rozkładów widmowych. W przypadku monochromatycznych źródeł LED satysfakcjonujące wyniki oraz modele jakich użyto do ich uzyskania prezentują autorzy artykułów [33÷34]. Natomiast w przypadku źródeł LED emitujących światło białe autorzy nie są już tak zgodni co do modeli pozwalających na odwzorowanie rozkładów

widmowych i proponują sposoby, które według nich pozwalają osiągnąć najlepsze dopasowania [35÷37].

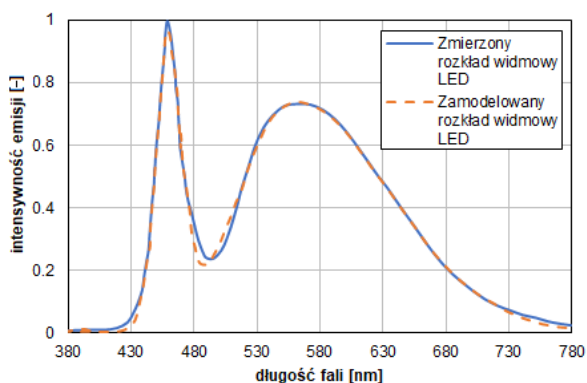
Autor artykułu [35] „Luminous Efficiency and Color Rendering of Phosphor-Converted White LEDs” proponuje rozwiązanie polegające na dokonaniu sumowania dwóch funkcji matematycznych, za pomocą których opisuje pełen rozkład widmowy (rys.1). Za pomocą funkcji Gaussa dokonywane jest odwzorowanie spektrum emisji niebieskiej diody LED InGaN (wzór 1), natomiast przy wykorzystaniu asymetrycznej funkcji Gaussa dokonywane jest odwzorowanie spektrum emisji luminoforu (wzór 2) [35]. Bazując na tym sposobie autor artykułu [35] osiąga wartość współczynnika dopasowania zamodelowanego rozkładu z rzeczywistym na poziomie 0,99.

$$(1) S_1 = A_1 \cdot \exp\left[-(4 \ln 2) \cdot \left(\frac{\lambda - \lambda_{10}}{\Delta \lambda_1}\right)^2\right]$$

gdzie: A_1 – intensywność, λ_{10} – długość fali dla której przypada pik widma, λ – długość fali, $\Delta \lambda_1$ – szerokość połówkowa widma.

$$(2) S_2 = A_2 \cdot \exp\left[-(4 \ln 2) \cdot \left(\frac{\lambda - \lambda_{20}}{\Delta \lambda_2 \cdot (1 + \text{sign}(\lambda - \lambda_{20}) \cdot \alpha)}\right)^2\right]$$

gdzie: A_2 – intensywność, λ_{20} – długość fali dla której przypada pik widma, λ – długość fali, $\Delta \lambda_2$ – szerokość połówkowa widma, α – współczynnik asymetryczności luminoforu



Rys.1. Zestawienie zmierzonego rozkładu widmowego LEDa oraz zamodelowanego, na podstawie opracowania własnego danych zamieszczonych w artykule [35].

W artykule [36] „Dynamic prediction of optical and chromatic performances for a light-emitting diode array based on a thermal-electrical-spectral model” autorzy zaprezentowali rozszerzony model Gaussa (wzór 3), rozszerzony model podwójnej sigmoidy (wzór 4) oraz rozszerzony model Lorentza (wzór 5), dzięki którym można odwzorować rozkład widmowy białej diody LED (rys.2) bazując na sumowaniu osobnie odwzorowanego spektrum niebieskiej LEDa oraz luminoforu.

$$(3) SPD_{LED}(\lambda) = a_1 \cdot \exp\left[-2 \cdot \left(\frac{\lambda - \lambda_{c1}}{w_1}\right)^2\right] + a_2 \cdot \exp\left[-2 \cdot \left(\frac{\lambda - \lambda_{c2}}{w_2}\right)^2\right]$$

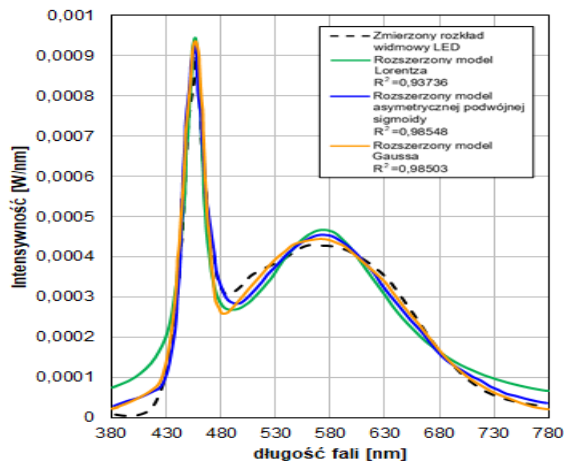
gdzie: a – intensywność, λ_c – długość fali dla której przypada pik widma, w – szerokość połówkowa widma.

$$(4) SPD_{LED}(\lambda) = b_1 \cdot \frac{1}{1 + \exp\left[-(\lambda - \lambda_{c1})/v_1\right]} + b_2 \cdot \frac{1}{1 + \exp\left[-(\lambda - \lambda_{c2})/v_2\right]}$$

gdzie: a – intensywność, λ_c – długość fali dla której przypada pik widma, u – wariancja niskoenergetycznej strony widma, v – wariancja wysokoenergetycznej strony widma.

$$(5) SPD_{LED}(\lambda) = \frac{2a_1}{\pi} \times \frac{w_1}{4(\lambda - \lambda_{c1}) + w_1^2} + \frac{2a_2}{\pi} \times \frac{w_2}{4(\lambda - \lambda_{c2}) + w_2^2}$$

gdzie: a – intensywność, λ_c – długość fali dla której przypada pik widma, w – szerokość połówkowa widma.



Rys.2. Zestawienie rozkładu widmowego LEDa oraz modeli wraz ze współczynnikiem dopasowania, na podstawie opracowania własnego danych zamieszczonych w artykule [36].

W artykule [37] „Extrapolation of phosphor converted white LED spectra beyond the visible wavelength range” autorzy skupili się na zaprezentowaniu sposobu modelowania rozkładu widmowego białej diody LED (rys.3) w oparciu o model Superpozycji Gaussa, w którym to rozkład widmowy dla zakresu fali krótkiej (spektrum diody niebieskiej) opisano funkcją zgodną z równaniem 6, natomiast pozostałą część rozkładu widmowego (spektrum luminoforu) opisano równaniem 7.

$$(6) \Phi_{LED}(\lambda) \rightarrow A \cdot \exp\left[-\left(\frac{\lambda_0 - \lambda}{w}\right)^2\right]$$

gdzie: A – amplituda widma, λ_0 – długość fali dla której przypada pik widma, w_0 – szerokość połówkowa widma.

$$(7) \Phi_{phosphor}(\lambda) = \sum_{i=1}^N c_i \cdot \exp\left[-\frac{(\lambda - \lambda_i)^2}{w_i^2}\right]$$

gdzie: λ_i – długość fali dla której przypada pik i-tego widma, w_i – szerokość połówkowa i-tego widma.

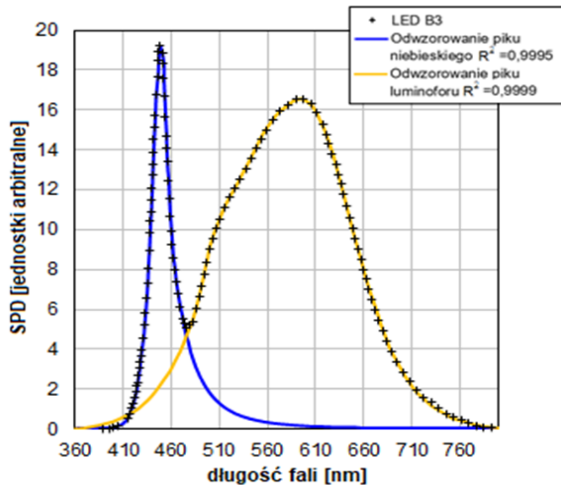
Istotnym jest aby opracowywane modele rozkładów widmowych białych diod LED były weryfikowalne, czyli aby istniały rzetelne oraz dokładne sposoby pozwalające na ocenienie w jakim stopniu różni się zamodelowany rozkład widmowy od rzeczywistego [34,38÷41].

Autorzy artykułu [34] „The LED spectral power distribution modelled by different functions - how spectral matching quality affected computed LED color parameters” proponują metrykę średniego błędu kwadrantowego (MSE), przedstawioną za pomocą wzoru 8.

$$(8) \sigma = \sqrt{\frac{\sum_j (I_m(\lambda_j) - I_e(\lambda_j))^2}{n}}$$

gdzie: $I_m(\lambda_j)$ – zmierzona rzeczywista wartość widmowa gęstości mocy promienistej dla fali λ_j , $I_e(\lambda_j)$ – wartość

widmowa gęstości mocy promienistej modelu dla fali λ_j , n – ilość pomiarów.



Rys.3. Zestawienie rozkładu widmowego LED B3 oraz modeli wraz z wartością współczynnika dopasowania, na podstawie opracowania własnego danych zamieszczonych w artykule [37].

W swoim artykule [38] „Comparative Study of Metrics for Spectral Match Quality” autorzy przedstawiają metrykę dobroci dopasowania współczynników (GFC), dla której wartość $GFC \geq 0,999$ mówi o dobrym dopasowaniu, natomiast $GFC \geq 0,9999$ o znakomitym dopasowaniu modelowanego rozkładu widmowego (wzór 9).

$$(9) \quad GFC = \frac{\left| \sum_j R_m(\lambda_j) \cdot R_e(\lambda_j) \right|}{\sqrt{\sum_j [R_m(\lambda_j)]^2} \cdot \sqrt{\sum_j [R_e(\lambda_j)]^2}}$$

gdzie: $R_m(\lambda_j)$ – zmierzona rzeczywista wartość widmowa gęstości mocy promienistej dla fali λ_j , $R_e(\lambda_j)$ – wartość widmowa gęstości mocy promienistej modelu dla fali λ_j .

Na podstawie artykułów [39+40] przedstawiona została metryka SID (wzór 10-12), która pozwala na uzyskanie informacji dotyczących zaistniałych rozbieżności spektralnych.

$$(10) \quad SID(x, y) = \sum_{i=1}^l (S_1) \cdot (S_2)$$

$$(11) \quad S_1 = \frac{I_t(x, y, \lambda_i)}{\sum_{j=1}^l I_t(x, y, \lambda_j)} - \frac{I_r(x, y, \lambda_i)}{\sum_{j=1}^l I_r(x, y, \lambda_j)}$$

$$(12) \quad S_2 = \log \frac{I_t(x, y, \lambda_i)}{\sum_{j=1}^l I_t(x, y, \lambda_j)} - \log \frac{I_r(x, y, \lambda_i)}{\sum_{j=1}^l I_r(x, y, \lambda_j)}$$

gdzie: $I_t(x, y, \lambda_i)$ – zmierzona rzeczywista wartość widmowa gęstości mocy promienistej dla fali λ_i , $I_r(x, y, \lambda_i)$ – wartość widmowa gęstości mocy promienistej modelu dla fali λ_j .

Należy również zwrócić uwagę, że posiadając współrzędne chromatyczności wyliczone na podstawie rozkładu widmowego rzeczywistego oraz modelowanego, istnieje możliwość wyliczenia wartości odległości jaka występuje pomiędzy tymi punktami na diagramie CIE1976.

Dokonać tego można dzięki parametrowi $\Delta u'v'$ [41], który obliczyć można posiłkując się wzorem 13.

$$(13) \quad \Delta u'v' = \sqrt{(u_2' - u_1')^2 + (v_2' - v_1')^2}$$

gdzie: (u_1', v_1') oraz (u_2', v_2') – to współrzędne chromatyczności dwóch punktów, dla których wyliczany jest parametr $\Delta u'v'$.

Materiały i metody

Bazując na przedstawionych w literaturze [35+37] sposobach pozwalających na dokonanie odzworowania rzeczywistego rozkładu widmowego źródła światła białego typu LED wybrano model Superpozycji Gaussa (wzór 14). Ustalono, że zamodelowanie rozkładów widmowych (rys.4) luminoforu $\text{Ca}_9\text{KMg}(\text{PO}_4)_7:1\% \text{Eu}^{2+}$ (szerzej opisanego w literaturze [42+43]) zostanie wykonane poprzez zsumowanie 12 rozkładów cząstkowych funkcji Gaussa. Zamodelowania rozkładów widmowych dokonano dla temperatur jego pracy od -50°C do 50°C wraz ze zmiennym krokiem wynoszącym 25°C .

$$(14) \quad \Phi_{\text{phosphor}}(\lambda) = \sum_{i=1}^{12} c_i \cdot \exp\left(-\frac{(\lambda - \lambda_i)^2}{w_i^2}\right)$$

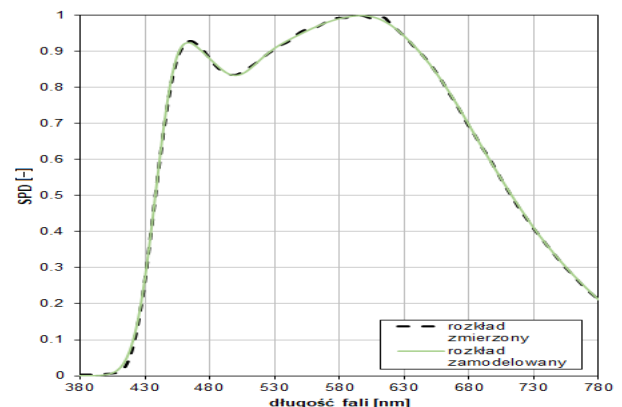
gdzie: λ_i – długość fali dla której przypada pik i-tego widma, w_i – szerokość połowkowa i-tego widma, c_i – amplituda i-tego widma.

Należy również podkreślić, że dokonano zbadania jak dokładnie można zamodelować rozkład widmowy bazując na modelu Superpozycji Gaussa. Dokonano tego poprzez wyliczenie rozbieżności między rozkładem widmowym zmierzonym, a rozkładem zamodelowanym opierając się na metrykach MSE, GFC, SID oraz $\Delta u'v'$.

Ostatni etap przeprowadzonych badań skupił się na zaprezentowaniu różnic parametrów świetlnych (CCT, D_{uv} , Ra, LER) zamodelowanego rozkładu widmowego poprzez zestawienie go z wymiennymi parametrami cechującymi rzeczywiste rozkłady widmowe badanego luminoforu w różnych temperaturach jego pracy.

Rezultaty

Na rysunku 4 przedstawiony zostały zamodelowany rozkład widmowy odzworowujący zmierzone SPD luminoforu przedstawione w literaturze [43] dla temperatury jego pracy wynoszącej 25°C . Wyniki tego dopasowania oraz pozostałych zamodelowanych rozkładów widmowych dla zakresu od -50°C do 50°C zestawione zostały w tabeli 1.



Rys.4. Zestawienie zmierzonego rozkładu widmowego LEDa w temperaturze pracy wynoszącej 25°C (opracowanie własne danych przedstawionych w literaturze [43]) oraz zamodelowanego w oparciu o model Superpozycji Gaussa.

Tabela 1. Zestawienie wyników metryk dopasowania rozkładu zmierzonoego z rozkładem zamodelowanym

| Temperatura otoczenia | metryka MSE | metryka GFC | metryka SID | metryka $\Delta u'v'$ |
|-----------------------|-------------|-------------|-------------|-----------------------|
| -50°C | 0,00288 | 0,99999 | 0,00052 | 0,0001 |
| -25°C | 0,00245 | 0,99999 | 0,00045 | 0,0000 |
| 0°C | 0,00231 | 0,99999 | 0,00054 | 0,0000 |
| 25°C | 0,00395 | 0,99998 | 0,00052 | 0,0000 |
| 50°C | 0,00301 | 0,99999 | 0,00079 | 0,0000 |

Dla rozkładów: zmierzonoego oraz zamodelowanego zestawione zostały parametry: parametr CCT (tabela 2), parametr R_a (tabela 3), parametr LER (tabela 4) oraz parametr D_{uv} (tabela 5). Zestawienia dokonano dla temperatur pracy od -50°C do 50°C.

Tabela 2. Zestawienie wyników parametru CCT dla rozkładu zmierzonoego oraz rozkładu zamodelowanego

| Temperatura otoczenia | CCT zmierzonoego SPD LEDa | CCT zamodelowanego SPD LEDa |
|-----------------------|---------------------------|-----------------------------|
| -50°C | 4628 K | 4628 K |
| -25°C | 4583 K | 4583 K |
| 0°C | 4580 K | 4580 K |
| 25°C | 4578 K | 4578 K |
| 50°C | 4586 K | 4585 K |

Tabela 3. Zestawienie wyników parametru R_a dla rozkładu zmierzonoego oraz rozkładu zamodelowanego

| Temperatura otoczenia | R_a dla zmierzonoego SPD LEDa | R_a dla zamodelowanego SPD LEDa |
|-----------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| -50°C | 95 | 95 |
| -25°C | 95 | 95 |
| 0°C | 94 | 94 |
| 25°C | 94 | 94 |
| 50°C | 93 | 93 |

Tabela 4. Zestawienie wyników parametru LER dla rozkładu zmierzonoego oraz rozkładu zamodelowanego

| Temperatura otoczenia | LER zmierzonoego SPD LEDa | LER zamodelowanego SPD LEDa |
|-----------------------|---------------------------|-----------------------------|
| -50°C | 251 | 251 |
| -25°C | 254 | 254 |
| 0°C | 257 | 257 |
| 25°C | 260 | 260 |
| 50°C | 262 | 262 |

Tabela 5. Zestawienie wyników parametru D_{uv} dla rozkładu zmierzonoego oraz rozkładu zamodelowanego

| Temperatura otoczenia | D_{uv} zmierzonoego SPD LEDa | D_{uv} zamodelowanego SPD LEDa |
|-----------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| -50°C | 0,0056 | 0,0056 |
| -25°C | 0,0057 | 0,0057 |
| 0°C | 0,0062 | 0,0062 |
| 25°C | 0,0066 | 0,0066 |
| 50°C | 0,0071 | 0,0071 |

Wnioski

Dokładność wykorzystanego modelu Superpozycji Gaussa potwierdzają wyniki metryk dopasowania zamieszczone w tabeli 1. Dane w niej zawarte potwierdzają, że zamodelowania rozkładów widmowych w zakresie ich pracy od -50°C do 50°C dokonane zostały w bardzo dokładny sposób. Wyniki metryki SID oraz MSE osiągają znikome wartości, co świadczy o bardzo małej rozbieżności między SPD modelowanym a rzeczywistym zmierzonym jego przebiegiem. Potwierdza to metryka GFC, której wyniki pozwalają na stwierdzenie znakomitego odwzorowania (w każdym przypadku wartości $GFC \geq 0,9999$). Co więcej, tylko dla -50°C metryka $\Delta u'v'$ nie wynosi 0, a osiąga wartość 0,0001 co jest nieistotną różnicą z punktu widzenia odbioru różnic barwnych światła przez człowieka.

Dokładność modelu superpozycji potwierdzają również, zestawione parametry (CCT, R_a , LER, D_{uv}) opisujące

rozkład rzeczywisty oraz modelowany. Wyniki te zamieszczone w tabelach od 2 do 5 są niemal w każdej sytuacji identyczne. Jedynie parametr CCT opisujący rozkład modelowany dla 50°C różni się od rzeczywistego, a różnica ta wynosi 1 K. Jest ona na tyle znikoma, że stwierdzenie bardzo dobrej dokładności cechującej użyty model do odwzorowania rzeczywistego rozkładu widmowego nie jest błędem.

„Badania zostały zrealizowane w ramach pracy nr WI/WE-IA/3/2022 w Politechnice Białostockiej i sfinansowane z subwencji badawczej przekazanej przez ministra właściwego do spraw nauki”

Autorzy: mgr inż. Maciej Listowski, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, Katedra Fotoniki, Elektroniki i Techniki Świetlnej, ul. Wiejska 45D, 15-352 Białystok, E-mail: maciej.listowski@doktoranci.pb.edu.pl

LITERATURA

- [1] Zheludev N., The life and times of the LED - A 100-year history, *Nature Photonics*, Vol. 1 (2007), 189-192
- [2] Muthu S., Schuurmans F. J. P., Pashley M. D., Red, Green, and Blue LEDs for White Light Illumination, *IEEE Journal On Selected Topics In Quantum Electronics*, Vol. 8 (2002), No. 2, 333-338
- [3] Muthu S., Schuurmans F. J., Pashley M. D., Red, Green, and Blue LED based white light generation: Issues and control, *Conference Record of the 2002 IEEE Industry Applications Conference. 37th IAS Annual Meeting*, 327-333, [doi: 10.1109/IAS.2002.1044108]
- [4] Steigerwald D. A., Bhat J. C., Collins D., Fletcher R. M., Holcomb M. O., Ludowise M. J., Martin P. S., Rudaz S. L., Illumination With Solid State Lighting Technology, *IEEE Journal On Selected Topics In Quantum Electronics*, Vol. 8 (2002), No. 2, 310-320
- [5] Sheu J. K., Chang S. J., Kuo C. H., Su Y. K., Wu L. W., Lin Y. C., Lai W. C., Tsai J. M., Chi G. C., Wu R. K., White-Light Emission From Near UV InGaN-GaN LED Chip Precoated With Blue/Green/Red Phosphors, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 15 (2003), No. 1, 18-20
- [6] Nishida T., Ban T., Kobayashi N., High-color-rendering light sources consisting of a 350-nm ultraviolet light-emitting diode and three-basal-color phosphors, *Applied Physics Letters*, Vol. 82 (2003), No. 22, 3817-3819
- [7] Nakamura S., Growth of $In_xGa_{(1-x)}N$ compound semiconductors and high-power InGaN/AlGaIn double heterostructure violet-light-emitting diodes, *Microelectronics Journal*, Vol.25 (1994), 651-659
- [8] Bado K., Sakano K., Noguchi Y., Shimizu Y., Development of High-bright and Pure-white LED Lamps, *Journal of Light & Visual Environment*, Vol.22 (1998), No.1, 2-5
- [9] Cho J., Park J. H., Kim J. K., Schubert E. F., White light-emitting diodes: History, progress, and future, *Laser&Photonics Reviews*, Vol.11 (2017), Issue 2, 1-17
- [10] Ohno Y., Practical Use and Calculation of CCT and D_{uv} , *LEUKOS: The Journal of the Illuminating Engineering Society of North America*, Vol.10 (2014), 47-55
- [11] Fryc I., Fryc J., Wąsowski K. A., Considerations about determining color rendering of light sources, *Przegląd Elektrotechniczny*, 92 (2016), nr 2, 218-223
- [12] Fryc I., Fryc J., Jakubowski P., Wąsowski K. A., Technical, medical and legal aspects of domestic light sources photobiological safety, *Przegląd Elektrotechniczny*, 93 (2017), nr 3, 232-237
- [13] Kowalska J., Analysis of parameters describing the quality of the color rendering of light sources according to the IES TM-30-15 and the CIE 013.3-1995, *Przegląd Elektrotechniczny*, 93 (2017), nr 6, 50-54
- [14] Huang Z., Liu Q., Luo M. R., Pointer M. R., Liu Y., Wang Y., Wu X., Whiteness and preference perception of white light sources: A case study at 5500 K with positive and negative D_{uv} values, *Optik – International Journal for Light and Electron Optics*, Vol. 240 (2021), 1-10

- [15] Fryc I., The spectral power distribution of LED driven by square shape pulses, *Przeegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012), nr 6, 131-133
- [16] Fryc I., Prorok M., White LED performance analyzed under their different working conditions, *Przeegląd Elektrotechniczny*, 89 (2013), nr 8, 274-276
- [17] Fryc I., Jakubowski P., Kołacz K., Analysis of optical radiation parameters of compact discharge HID lamps and LED COB modules used for illuminating shop windows, *Przeegląd Elektrotechniczny*, 93 (2017), nr 11, 186-189
- [18] Jakubowski P., Kowalska J., Supronowicz R., Fryc I., The Influence of Spectral Measurements Uncertainty of Fluorescent Lamps on Calculated Value of their Relative Melanopic Weighted Irradiance and Colour Quality Parameters, *VII Lighting Conference of the Visegrad Countries LUMEN V4* (2018), [doi: 10.1109/LUMENV.2018.8520975]
- [19] Ye Z.-T., Chang C., Juan M.-C., Chen K.-J., Luminous Intensity Field Optimization for Antiglare LED Desk Lamp without Second Optical Element, *Applied Sciences*, Vol.10 (2020), 1-13
- [20] Kubiak K., Shaping reflector for asymmetric LED floodlighting reflector, *Przeegląd Elektrotechniczny*, 94 (2018), nr 2, 128-133
- [21] Fryc I., Tabaka P., The night sky light pollution created by outdoor luminaires, *Przeegląd Elektrotechniczny*, 93 (2017), nr 6, 46-49
- [22] Czyżewski D., Comparison of luminance distribution on the lighting surface of power LEDs, *Photonics Letters of Poland*, Vol. 11(4) (2019), 118-120
- [23] Czyżewski D., Selected problems of defining the luminous area of electroluminescent diodes, *Przeegląd Elektrotechniczny*, 84 (2008), nr 8, 125-128
- [24] Czyżewski D., Luminance distribution of LED luminous surface, *Przeegląd Elektrotechniczny*, 86 (2010), nr 10, 166-169
- [25] Tyukhova Y., Waters C., An Assessment of High Dynamic Range Luminance Measurements with LED Lighting, *LEUKOS: The Journal of the Illuminating Engineering Society of North America*, Vol.10 (2014), 87-99
- [26] Fryc I., Measurement techniques of optical LEDs properties performed with compliance conformity with CIE 127:2007 standard, *Przeegląd Elektrotechniczny*, 85 (2009), nr 11, 317-319
- [27] Mozyrska D., Wyrwas M., Fryc I., The determination of the LEDs colorimetric parameters, in the range of their operating temperature, *Przeegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012), nr 4a, 232-234
- [28] Bonisławski, K., Fryc, I., The study on optical properties of LEDs used for vehicle control lighting, *Przeegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012), nr 3a, 119-120
- [29] Czech E., Fryc I., Power control method of color LEDs based luminaires, emitting constant light output, independent from the conditions of its operating environment, *Przeegląd Elektrotechniczny*, 90 (2014), nr 1, 270-272
- [30] Gu Y., Narendran N., A Non-contact Method for Determining Junction Temperature of Phosphor-Converted White LEDs, *Third International Conference On Solid State Lighting*, Vol. 5187 (2004), 107-114 [doi: 10.1117/12.509751]
- [31] Chhajed S., Xi Y., Li Y. L., Gessmann T., Schubert F. F., Influence of junction temperature on chromaticity and color-rendering properties of trichromatic white-light sources based on light-emitting diodes, *Journal of Applied Physics*, 97 (2005), 1-8
- [32] Ryu G.-H., Byungjin M., Ryu H.-Y., Temperature dependence of the color rendering index of a phosphor-conversion white light-emitting diode, *AIP Advances*, Vol.9 (2019), Issue 1, [doi: 10.1063/1.5066351]
- [33] Mozyrska D., Fryc I., Approximation of spectroradiometric data by fractional model, *Przeegląd Elektrotechniczny*, 87 (2011), nr 2, 255-257
- [34] Supronowicz R., Fryc I., The LED spectral power distribution modelled by different functions - how spectral matching quality affected computed LED color parameters, *2019 Second Balkan Junior Conference on Lighting (Balkan Light Junior)* (2019), 1-4, [doi: 10.1109/BLJ.2019.8883564]
- [35] Zheng R., Luminous Efficiency and Color Rendering of Phosphor-Converted White LEDs, *Journal of Light & Visual Environment*, Vol.32 (2008), 230-233
- [36] Fan J., Chen W., Yuan W., Fan X., Zhang G., Dynamic prediction of optical and chromatic performances for a light-emitting diode array based on a thermal-electrical-spectral model, *Optics Express*, Vol.28 (2020), 13921-13937
- [37] Schneider T., Dekker P., Young R., Blattner P., Poikonen T., Extrapolation of phosphor converted white LED spectra beyond the visible wavelength range, *Proceedings of the 29th CIE SESSION Washington D.C., USA, June 14 – 22, (2019)*, 1229-1237, [doi:10.25039/x46.2019.PO105]
- [38] Imai F. H., Rosen M. R., Berns R. S., Comparative Study of Metrics for Spectral Match Quality, *CGIV 2002: The First European Conference on Colour in Graphics, Imaging, and Vision*
- [39] Chang C., Spectral information divergence for hyperspectral image analysis, *IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS'99, (1999)*, 509-511
- [40] Shrestha R., Pillay R., George S., Hardeberg J. Y., Quality Evaluation in Spectral Imaging – Quality Factors and Metrics, *Journal of the International Colour Association*, 12 (2014), 22-35
- [41] CIE TN 001:2014 Chromaticity Difference Specification for Light Sources
- [42] Pazik R., Zawisza K., Watras A., Maleszka-Bagińska K., Boutinaud P., Majiou R., Dereń J.P., Thermal quenching mechanisms of the Eu³⁺ luminescence in Ca₉Al(PO₄)₇ obtained by citric route, *Materials Research Bulletin*, 48 (2013), 337-342
- [43] Supronowicz R., Fan J., Listowski M., Watras A., Fryc I., Application of different metrics for describing light color quality of a white LED, *Photonics Letters of Poland*, Vol. 13 (2) (2021), 31-33