

doi:10.15199/48.2025.01.55

Źródło półprzewodnikowe SSL o regulowanej temperaturze barwowej w układzie obrotowego luminoforu sektorowego

Streszczenie. Ewolucja półprzewodnikowych źródeł SSL ukierunkowana jest na zachowanie wysokiej skuteczności świetlnej przy równoległych możliwościach regulacji kolorymetrycznych. Zakres zmiany najbliższej temperatury barwowej CCT dotyczy zagadnień cyklu okołodobowego jak również zapewnienia stabilności strojenia barwnego CIE. Bazowym rozwiązaniem uzyskiwania światła białego jest współpraca niebieskiego emitera LED przy dopasowanym spektralnie luminoforem. W artykule przedstawiono metodę kluczowania sygnału PWM przy dynamicznym modelowaniu rozkładów spektralnych w układzie świetlno – optycznym z wydzielonym wirującym luminoforem sektorowym. Dowiedziano doświadczalną zmianę najbliższej temperatury barwowej w przedziale od 2700 K do 9600 K, uwzględniając normatywny wskaźnik oddawania braw CRI oraz wytyczne SVM dotyczące fluktuacji strumienia świetlnego w dziedzinie czasu.

Abstract. The evolution of semiconductor SSL sources is aimed at maintaining high luminous efficiency with parallel possibilities of colorimetric adjustments. The scope of change of the nearest CCT color temperature concerns the issues of the circadian cycle as well as ensuring the stability of the CIE color tuning. The basic solution for obtaining white light is the cooperation of a blue LED emitter with a spectral-matched phosphor. The article presents a method of keying the PWM signal for dynamic modeling of spectral distributions in a light-optical system with a separate rotating sector phosphor. An experimental change closest to the color temperature was realized in the range from 2700 K to 9600 K, taking into account the normative CRI index and SVM guidelines for light flux fluctuations in the time (**Solid-state lighting source with adjustable color temperature in a phosphor rotating sectors system**).

Słowa kluczowe: LED, temperatura barwowa, luminofor sektorowy, modulacja PWM, prowadnica optyczna

Keywords: LED, color temperature, phosphor sector, PWM modulation, optical fiber

Wstęp

Typowe powszechne źródła światła białego LED bazują na połączeniu niezależnych zjawisk fotoluminescencji oraz elektroluminescencji. Pod względem budowy wewnętrznej, nowoczesne promienniki składają się z odpowiednio dobranego emitera półprzewodnikowego LED (określona szerokość przerwy energetycznej w modelu pasmowym), którego spektrum emisji leży w wąskim zakresie absorpcji materiału luminescencyjnego [1]. Typowa konstrukcja świetlno – optyczna oparta na bezpośrednim sprzężeniu (np. COB) pozwala wydajnie konwertować wąskopasmowe promieniowanie wymuszające n -UV na zakres VIS, przy ograniczeniu natężenia mocy promienistej do $1,0 \text{ W/cm}^2$ [2].

Natomiast regulacja parametrów kolorymetrycznych CIE możliwa jest wyłącznie poprzez wykorzystanie układów wieloemiterowych [3] (tj. RGBW) charakteryzujących się dynamicznie przestrajalnym, lecz nieciągłym rozkładem spektralnym. Konsekwentnie istnieją również źródła statyczne W-LED [4], wykorzystujące pośrednią konwersję (fotoluminescencję). Wynikowe parametry jakościowe światła białego, takie jak zdolność reprodukcji kolorów CRI czy najbliższa skorelowana temperatura barwowa CCT są zależne głównie od indywidualnych parametrów luminoforu przy wymuszeniu dedykowanym [5].

W artykule zaproponowano autorską koncepcję źródła SSL z wydzielonym sektorowym luminoforem wirującym. Opracowane rozwiązanie pozwala na periodyczne modelowanie położenia barwy chromatycznej CIE(xy) 1931 w predefiniowanym obszarze krzywej Plancka CCT(xy). Prototypową oprawę emitera SSL oparto na pojedynczym monochromatycznym źródle półprzewodnikowym LED na zakresie promieniowania 455 nm, pełniącym zarówno rolę wymuszającą oraz regulacyjną, przez zsynchronizowanie sygnału sterującego z bieżącym geometrycznym położeniem na obracającym się cyklicznie luminoforze sektorowym [6].

Wydzielenie źródła pierwotnego (emitera p-p LED) od części luminescencyjnej wtórej zapewnia lepsze parametry termodynamiczne, jak również pośrednio uzyskanie znacznych punktowych gęstości mocy optycznej (7 W/cm^2),

poprzez pozorne zwiększenie po obwodzie powierzchni czynnej konwertera.

Do realizacji założonego celu zaproponowano poniższą uogólnioną metodykę pracy:

- budowa modułu zasilającego oprawę SSL oraz układu sterowania przy wykorzystaniu ośmiobitowego mikrokontrolera typu AVR do wyjściowych obwodów scalonych peryferyjnych,
- przeprowadzenie badań laboratoryjnych modelu oprawy źródła SSL przy wykorzystaniu czołowo sprzężonej prowadnicy optycznej z wydzielonym luminoforem według opracowanych autorskich algorytmów obliczeniowych i regulacyjnych,
- ocena skuteczności działania prototypowego układu według wybranych kryteriów tj. położenie uzyskanych parametrów barwnych chromatycznych CIE_{xy}, zakresu regulacji CCT, wskaźnika oddawania barw CRI, stopnia fluktuacją strumienia świetlnego SVM oraz efektywności energetycznej źródła (skuteczności świetlnej).

Luminofory, jako aktywne optycznie materiały wykorzystujące zjawisko fotoluminescencji, pozwalają na wydajną energetycznie konwersję widma promieniowania przy sprawności kwantowej rzędu 89% [7], (200 lm/W [8]).

Wydzielona konfiguracja geometryczna układu: pompa p-p LED – materiał fotoluminescencyjny (emisja pośrednia) wprowadza fizyczną izolację termiczną, utrzymując znamionowe parametry pracy luminoforu.

Bazowe jednoskładnikowe luminescencyjne materiały domieszkowane cerem (YAG:Ce³⁺), nie pozwalają na uzyskiwanie wymaganych CRI oraz niskich temperatur barwowych (poniżej 4000 K) [9], lecz cechują się dobrą sprawnością konwersji. Celem doboru odpowiedniego położenia barwnego CIE_{xy} oraz modelowania rozkładu spektralnego (strojenia temperatury barwowej CCT) stosuje się dodatkowy komplementarny konwerter charakteryzujący się wyraźnym wzmocnieniem pasma w zakresie barwy czerwonej (630 nm), oparty na jonach Eu²⁺. Stanowi to grupa luminoforów emitujących światło barwy ciepłobiałej o znormalizowanych lepszych parametrach jakościowych (wskaźnik CRI ≥ 80 [10]) niż wersja podstawowa, oparta wyłącznie o pojedynczy aktywator. W wyniku obecności

skompletowanych domieszek jonów pierwiastków ziem rzadkich, możliwe jest uzyskanie tzw. transferu energii [11].

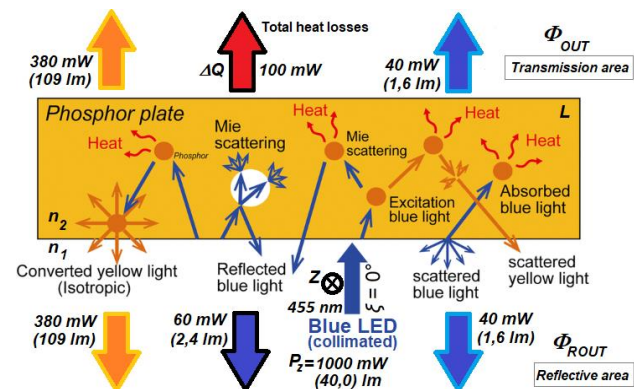
Następstwem zaistnienia przejść promienistych fotonu po dostępnych metastabilnych poziomach energetycznych danego konwertera jest wyłącznie statyczne modelowanie kształtu widma promieniowania niskoenergetycznego w ciągłym zakresie widzialnym VIS (tzw. przestrzajalna luminescencja).

Pod względem kolorymetrii, możliwe jest uzyskanie praktycznie dowolnej temperatury barwowej najbliższej CCT, przy zachowaniu wysokiej sprawności konwersji wieloskładnikowego luminoforu (skomplikowana struktura współzależności absorpcyjno – emisyjnej lantanowców) [5].

Bilans energetyczny luminoforu wymuszonego dedykowanymi źródłami półprzewodnikowymi

Na podstawie badań porównawczych dokonano pomiaru krzywej wskaźnikowej fotoluminescencji próbki w kierunku normalnym (zgodnym) do skolimowanego źródła wymuszającego oraz konfiguracji geometrycznej wstecznej. Wzbudzony luminofor charakteryzował się rozkładem przestrzennym zbliżonym do teoretycznej powierzchni lambertowskiej w obu półprzestrzeniach, przy wymuszeniu dedykowanym emiterem LED 455 nm. Wykazano natomiast występowanie refleksyjności promieniowania na granicy propagacji ośrodków optycznych. Typowe właściwości materiału fotoluminescencyjnego L określane są danym współczynnikiem załamania w zakresie: $n_2 = 1,6 - 2,6$ [12]. Oszacowano, że około 6% całej mocy optycznej padającej prostopadle ulega odbiciu zwierciadlanym, przy czym stopień tego niekorzystnego zjawiska Fresnela nasila się wykładniczo, wraz ze zwiększeniem kąta padania ($\xi \geq 60^\circ$).

Ponadto doświadczalnie określono rzeczywistą sprawność konwersji η_K (reemisji) oraz przybliżony bilans energii ulegającej procesowi przemiany fotonowej w danym materiale fotoluminescencyjnym typu: CL-835 [8] (rys. 1).

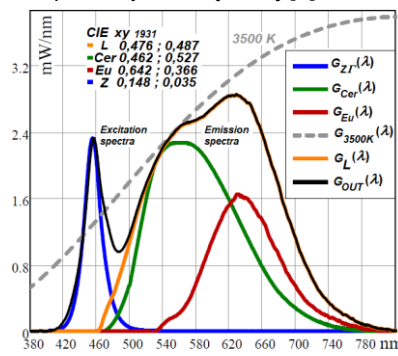


Rys.1. Pomiarowy bilans rozsyłu mocy optycznej P_Z dla luminoforu wymuszonego promieniowaniem dedykowanym LED 455 nm [13] gdzie: Φ_{OUT} – wyjściowy (mierzony) transmisyjny strumień świetlny, Φ_{ROUT} – wyjściowy scałkowany strumień świetlny emitowany w kierunku zwrotnym (refleksyjnym), ξ – kąt padania wiązki promieniowa skolimowanego, L – badana próbka luminoforu, ΔQ – straty cieplne, Z – pierwotne źródło półprzewodnikowe LED.

W wyniku kwantowego zjawiska konwersji, następuje absorpcja promieniowania wymuszającego P_Z oraz emisja niskoenergetycznego spektrum widzialnego VIS o szerszym rozkładzie i mniejszej gęstości mocy optycznej (rysunek 2). Większość, gdyż prawie 76% całej mocy optycznej, podlega zjawisku fotoluminescencji (wyizolowana barwa żółta G_L), natomiast sumarycznie ponad 8% promieniowania źródła pierwotnego Z ulega silnemu rozpraszaniu Mie w strukturze luminoforu. Następstwem tej korelacji jest bierne samoistne zmieszanie w widmie wynikowym $G_{OUT}(\lambda)$, bezpośredniej składowej barwy niebieskiej G_Z . Determinuje to temperaturę

barwową najbliższą CCT światła barwy białej oraz jej punkt kolorymetryczny przecinający się z rozkładem Plancka [9].

Laboratoryjne przyjęto, że około 10% to niekorzystne stratne zjawiska niepromieniste ΔQ wywołujące jedynie wzrost temperatury wewnętrznej [7].



Rys.2. Wyniki bezwzględny rozkład spektralny $G(\lambda)$ odpowiedzi fotoluminescencji dla wymuszenia p-p dedykowanego w układzie z kulą całkującą na półprzestrzeni transmisyjnej luminoforu 3500 K gdzie: $G_Z(\lambda)$ – przepuszczony bierne rozkład spektralny źródła pierwotnego przez luminofor, $G_L(\lambda)$ – wyizolowana charakterystyka widmowa luminescencji złożona z sumarycznych pasm emisyjnych aktywatorów opartych na jonach Europu $G_{Eu}(\lambda)$ oraz Ceru $G_{Cer}(\lambda)$, $G_{3500K}(\lambda)$ – ekwiwalentny teoretyczny rozkład gęstości Plancka dla promieniowania ciała doskonale czarnego, $G_{OUT}(\lambda)$ – pomiarowy wyjściowy rozkład spektralny transmisyjny.

Tabela 1. Zestawienie parametrów świetlnych przy wymuszeniu luminoforu CL-835 bazowym emiterem półprzewodnikowym LED

LED	CRI	CIE xy 1931	Δd	CCT	η_K
455 nm	82,8	0,403 ; 0,388	0,00051	3534,7 K	221,2 lm/W

Model matematyczny dotyczący bilansu energetycznego badanego luminoforu oszacowano na podstawie pomiarów bezwzględnych rozkładów gęstości mocy sygnału $G_{OUT}(\lambda)$. Otrzymana charakterystyka spektralna (rys. 2, tabela 1) promieniowania fotoluminescencji L wymuszonego źródłem pierwotnym Z (rozdzielczość dyspersyjną monochromatora skonfigurowano z krokiem detekcyjnym $\Delta\lambda = 1$ nm), po scałkowaniu numerycznym widma w rozszerzonym paśmie VIS (założono zakres: 380 nm – 820 nm), zwraca wartość połowkowego strumienia świetlnego Φ_{OUT} , przy określonej stałej mocy optycznej równej $P_Z = 1000$ mW:

$$(1) \Phi_{OUT} = 683 \int_{380}^{820} G_{OUT}(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda, G_{OUT} = G_Z + G_L$$

Terminalnym parametrem jest użyteczna sprawność konwersji luminoforu η_K [lm/W] obliczana, jako stosunek dostarczonej mocy promienistej P_Z , względem całkowitego strumienia świetlnego w przestrzeni (4 π). Powołując się na poprzednie rozważania dotyczące krzywej wskaźnikowej rozsyłu luminescencji przyjęto przybliżenie ($\Phi_{OUT} \approx \Phi_{ROUT}$). Zatem uwzględniając reemisję promieniowania wtórnego z materiału L, równolegle w obie półprzestrzynie kąta bryłowego ($\omega = 2\pi$), zmierzony strumień wyjściowy Φ_{OUT} należy podwoić w równaniu końcowym:

$$(2) \eta_K = \frac{\Phi_{OUT} + \Phi_{ROUT}}{P_Z - (0,06 P_Z \rightarrow 0)} = \frac{683 \int_{380}^{820} 2 \cdot G_{OUT}(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{P_Z}$$

gdzie: () – oznaczono dodatkowe nieuwzględniony w obliczeniach człon ilościowy stratnego promieniowania odbitego zwierciadlanie.

W układzie pomiarowym z kulą całkującą wyjściowy sumaryczny jednostronnie mierzony rozkład spektralny źródła pierwotnego Z nie ulega deformacji widmowej po przepuszczaniu przez materiał konwertujący w przedziale tj. 380 nm - 500 nm (zakres absorpcji). Iloraz amplitudy źródła

$G_Z(\lambda)$ do wartości transmisyjnej $G_{ZT}(\lambda)$, określił szacunkowy współczynnik przepuszczania Γ_B (455 nm) = 0,043.

Matematycznie wyizolowany rozkład spektralny - $G_L(\lambda)$, emitowany wyłącznie w wyniku zjawiska fotoluminescencji, wyznaczono poprzez różnicę algebraiczną funkcji gęstości strumienia cząstkowego biernie transmitowanego od źródła pierwotnego $G_{ZT}(\lambda)$. Zależność opisano poniższym wzorem:

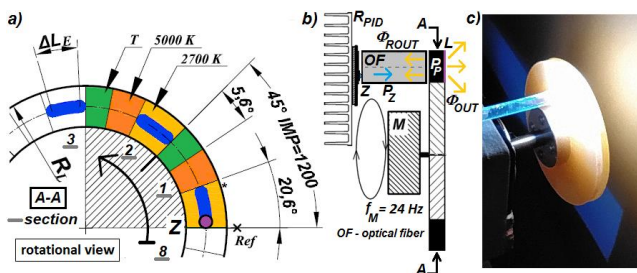
$$(3) G_L(\lambda) = G_{OUT}(\lambda) - \underbrace{\Gamma_B \cdot G_{ZT}(\lambda)}_{G_{ZT}(\lambda)}, \quad G_L = G_{Cer} + G_{Eu}$$

Wyodrębniona fotoluminescencja: $G_L(\lambda)$ jest wynikiem sumy prefabrykowanego zestawienia dwuskładnikowych podpasm charakterystyk widmowych: $G_{Cer}(\lambda) + G_{Eu}(\lambda)$ (aktywatorów), modelując tym odpowiedni punkt chromatyczny CIE $F(x,y)$ (docelowo CCT) odpowiedzi spektralnej luminoforu [33]. Natomiast numerycznie zrealizowany rozkład gęstości $G_L(\lambda)$, możliwy jest do otrzymania pomiarowo, poprzez zastosowanie odpowiednio dobranych serii filtrów interferencyjnych oraz absorpcyjnych monochromatycznych na długość fali tłumienia $\lambda_A = 455$ nm. W omawianym przypadku dowiedziono ekwiwalentu doświadczenia przy zaproponowanej metodzie obliczeniowej. Analogicznie oblicza się również pozostałe parametry świetlne, w tym udział składowych luminescencyjnych wewnętrznych tzn.: $G_{Cer}(\lambda)$ i $G_{Eu}(\lambda)$, poprzez zestawienie rozkładów widmowych przy jednoskładnikowych konwerterach bazowych określanych, jako wysokotemperaturowe (CCT = 5000 K*).

Wartość oszacowanego doświadczalnie parametru sprawności przemiany luminoforu η_K dla typu promiennika wtórnego CL-835 (tj. ponad 220 lm/W), wpisuje się w przedział liczbowy podawany w dokumentacji technicznej producenta [8].

Realizacja prototypowego układu źródła SSL

Założenia projektowe oprawy SSL z wirującym luminoforem sektorowym bazują na pojedynczej pompie półprzewodnikowej LED 455 nm sterowanej wspólnym sygnałem prądowym I_Z , o regulowanym współczynniku wypełnienia PWM oraz amplitudzie A_{DAC} . Dodatkowo źródło wyposażono w aktywny układ korekcji temperatury R_{PID} (regulator PID) opartej na module Peltiera [14]. Napęd w postaci silnika krokowego M powoduje stałe periodyczne przesunięcie kątowe powierzchni sektorów luminoforów f_M synchroniczne z danym sygnałem załączania pracy źródła wymuszającego $f_Z = 8 \times f_M$. Zadana regulacja współczynnika wypełnienia PWM pozwala na pozycjonowanie promieniowania P_P na wybranych obszarach. W sekcji wkomponowano dyfuzyjny dwa różne typy materiałów luminescencyjnych (CL-5000K oraz CL-2700K) oraz transparentną optyczną powierzchnię rozpraszającą T , dedykowaną do stratnego bezpośredniego przepuszczania promieniowania źródła o barwie niebieskiej, ekwiwalentny współczynnik transmisji $\Gamma_T = 0,65$, przyjęto 8 sekcji (rys. 3).



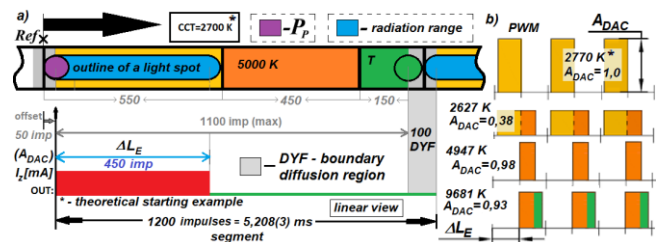
Rys.3. Graficzna interpretacja markowania płaszczyzny obrotowej wirnika luminoforów sektorowych w przypadkuysterowania źródła sygnałem prądowym PWM $\Delta L_E = 450$ impulsów (1,953 ms), przy częstotliwości kluczowania $f_Z = 192$ Hz; 5,2 ms (CCT = 2700 K*),

a) wizualizacja przebiegu smugi promieniowania P_P w układzie rotacyjnym, b) schemat blokowy zespołu świetlny - optycznego, c) fotografia rzeczywista układu oprawy SSL przy neutralnym CCT

Modelowanie rozkładu barwnego CIE_{xy} polega na odpowiednim wymuszaniu czasowym składowych sekcji, poprzez sterowanie długością ΔL_E wypełnienia impulsów zsynchronizowanych załączających źródło promieniowania, a danym położeniem wirującego luminoforu L .

Rozważany przypadek konfiguracji pracy emitera przy pełnymysterowaniu (brak przełączania $\Delta L_E = 1200$ imp.) skutkuje uzyskaniem (CCT = 4261 K) quasi-pośredniej temperatury barwowej, na podstawie addytywnego złożenia względnych rozkładów spektralnych naprzemiennej emisji następujących po sobie trzech sekwencji pasma VIS. Występuje tutaj wzajemne przeciwstawne znoszenie się periodu zakresu regulacji kolorymetrycznej najbliższej temperatury barwowej CCT. Mianowicie, poprzez obniżanie parametru świetlnego dla zakresu nastaw: $450 < \Delta L_E < 850$, (L_{2700K} , L_{5000K}), przy jednoczesnym zwiększeniu w obszarze pracy (L_{5000K} , T) tj. $850 < \Delta L_E < 1100$ (1200). Uwzględniana jest zatem praca dwustopniowa polegająca na mieszaniu wyłącznie pary sekcji luminescencyjnych ograniczając stopień zmian parametru CCT do poziomu z zakresu typów użytych luminoforów sąsiadujących oraz konfiguracja współbieżna z addytywnym prześwietlaniem źródła pierwotnego przez okno transmisyjne T .

Schematyczny przykład wizualizacji uzysku najniższej możliwej temperatury barwowej (2700 K*), przy nastawie długości smugi świetlnej aktywowanego obszaru luminescencji przez źródło wymuszające przy utrzymanej synchronizacji, gdzie $\Delta L_E = 450$ impulsów zliczających zawarto na rysunku 4a. W związku z ograniczeniem na występowanie pewnego nieznacznego przenikania promieniowania sąsiadujących sekcji, określano nieaktywny obszar dyfuzyjny $DYF = 100$ imp. Stabilizowany ilościowy strumień świetlny Φ_{OUT} dobrano poprzez regulację amplitudy A_{DAC} (wartość prądu zasilającego emiter I_Z), w zależności od współczynnika wypełnienia ΔL_E i stopnia sprawności konwersji η markowanych promieniowaniem P_P obszarów świetlnych wtórnych (rys. 4b).



Rys.4. a) Konfiguracja liniowa przebiegu naświetlania sekcji luminoforów sektorowych przy zadaniu nastawy: CCT = 2700 K*, b) oscylogram czasowej zmienności kluczowania przebiegów prądowych I_Z o amplitudzie A_{DAC} , dla wybranych przypadków pracy.

W związku z tym, że przełączanie amplitudowo - fazowe źródła jest znacznie powyżej częstotliwości zanikowej oka ludzkiego (około 60 Hz), odbierana jest uśredniona wartość kolorymetryczna (CIE_{xy}) CCT, mimo braku bezwzględnego sumarycznego zmieszania spektralnego [15]. Natomiast w urządzeniach pomiarowych termin bezwładności obserwacji określany jest poprzez przyjętą stałą całkowania sygnałów z detektorów fotometrycznych.

$$(4) \Phi_{OUT} = \frac{A_{DAC} P_P}{1200} \left(\frac{\eta_{L2.7k}}{2} \overbrace{\vartheta_{2.7k}}^{\max : 450} + \frac{\eta_{L5k}}{2} \overbrace{\vartheta_{5k}}^{350} + \frac{\Gamma_T \eta_{TB}}{26 \text{ lm/W}} \overbrace{\vartheta_T}^{100} \right)$$

gdzie: $\vartheta_{(Lx,T)}(\Delta L_E)$ - indywidualny stopień wypełnienia sygnału ΔL_E promieniowania względem wybranego obszaru luminescencyjnego oznaczonego CCT → ($Lx = 2.7k, 5k$) lub okna transmisyjnego T ,

η_{Lx} – sprawność konwersji sekcji luminoforu Lx typu: 2.7k, 5k, η_{TB} – wartość związana z odwzorowaniem strumienia świetlnego na jednostkę mocy optycznej widma monochromatycznego źródła pierwotnego $G_Z(\lambda)$ dla warstwy rozpraszającej – przepuszczającej.

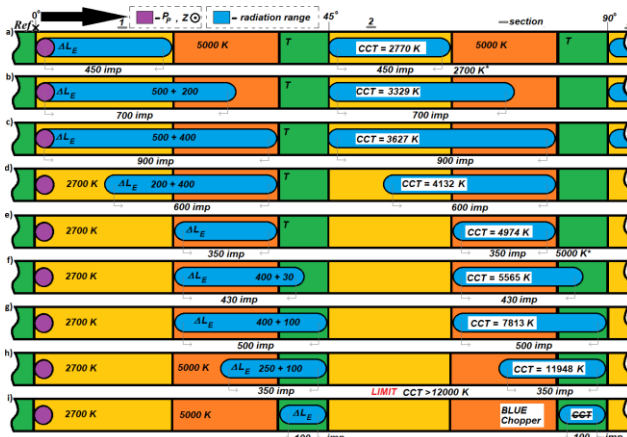
Występująca nieujednolicona zmienna sprawność świetlna poszczególnych warstw optycznych danego segmentu (tj. $\eta_{L2.7k} : \eta_{L5k} : \Gamma_T \cdot \eta_{TB} \approx 243 : 193 : 26$) prowadzi do pewnych modyfikacji długości ekspozycji ΔL_E [imp.] na promieniowanie lub stopnia koncentracji promieniowania P_P przy odpowiednim położeniu wału po obwodzie rotującego luminoforu. Celem jest zachowanie ilościowej stałości proporcji w wynikowym strumieniu świetlnym i zlimitowania przenikania barwy niebieskiej, poprzez wielkość kątową przesłony T . Proporcje kątowe dobrano kierując się zasadą zachowania stosunku możliwie jednolitych maksymalnych strumieni cząstkowych sekcji przy pełnym wypełnieniu $\vartheta_{(Lx)}$.

Realizacja metody modulacji promieniowania, poprzez cykliczną zmianę widma promieniowania światła białego, wykonano poprzez cyfrowy układ sterowania na bazie mikrokontrolera, wykorzystując parę liczników sprzętowych, zsynchronizowanych z taktowaniem systemowym 3,68 MHz. Dzięki temu, sterowanie układem elektromechanicznym oraz źródłem wymuszającym jest ściśle powiązane z następowaniem po sobie odpowiednich dwóch komórek sekcji materiału luminescencyjnego oraz okna dyfuzyjnego.

Omawiany przypadek podstawowy (rys.5a) uzyskania światła białego o CCT na poziomie 2700 K*, następuje przy załączeniu periodycznym emitera Z (192 Hz), włącznie na powierzchni wału luminoforu w zakresach kątowych: offset 1,9°(++45°) – 18,7°(++45°), licząc od punktu referencyjnego REF ($\Delta L_E = 450$ imp.). Dalsza regulacja (rys.5c) polega na stopniowym dodawaniu aktywnego fragmentu powierzchni luminoforu 5000 K: ϑ_{5k}^* , uzyskując przypadek graniczny przy wypełnieniu sygnału P_P dla nastawy $\Delta L_E = 850$ imp. dając ilościowe zmieszanie strumieni elementarnych dwóch typów luminoforów w proporcji 1,0 : 1,0 (CCT = 3627 K). Następnie pojawia się proces odwróconego markowania (rys.5d) tak, aby strumień świetlny luminoforu o niższej temperaturze barwowej występował w mniejszej powierzchniowo czynnej długości $\vartheta_{2.7k} \rightarrow 0$, aż do momentu wzbudzenia wyłącznie obszaru luminoforu o temperaturze CCT = 5000 K, kończąc etap I stopnia regulacji, gdzie: $\vartheta_{2.7k} = 0$, $\vartheta_{5k} = 350$ (rys.5e).

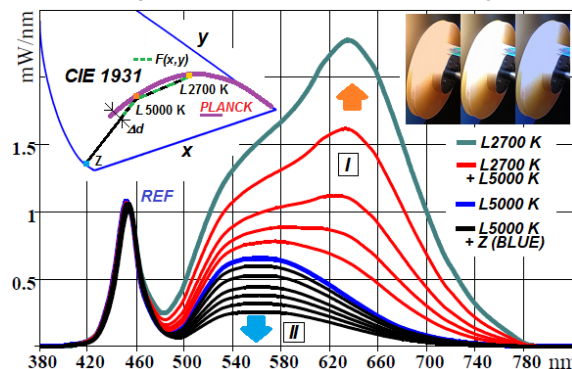
Dalsze zwiększanie parametru CCT jest tylko możliwe poprzez bezpośrednie dodawanie niezmiennego widma emitera $G_Z(\lambda)$ do strumienia widma wyjściowego Φ_{OUT} . Sygnał źródła pierwotnego P_P (rys.5f) padający na obszar przepuszczalny T (nieulegający konwersji), zwiększa udział składowej strumienia barwy niebieskiej w zależności od wypełnienia sygnału ϑ^{+} (tj. II stopień regulacji). Sterowanie rozszerzone przesuwają odcinkowo punkt kolorymetryczny CIE $F(x,y)$ względem początkowej konfiguracji barwnej dla sekcji luminoforu wysokotemperaturowego (0,344 ; 0,355) w kierunku wierzchołka barwy niebieskiej układu CIExy (ZBLUE : $x = 0,148$; $y = 0,035$). Zwiększając stopień wartości amplitudy promieniowania wąskopasmowego $\lambda_Z = 455$ nm (rys.5h), zmieniamy najbliższą temperaturę barwową CCT przy stopniowym oddalaniu kolorymetrycznym Δd od krzywej teoretycznej rozkładu temperaturowego. Przy czym, graniczną wartością teoretyczną (do 0,02) mieszczącą się w obszarze dopuszczalnego odchylenia dla światła białego uzyskaną opisaną metodą jest nawet 12 000 K – 16 000 K. Natomiast w układzie prototypowym przyjęto limit na poziomie około CCT = 9 800 K ze względu na występujący znaczny spadek wyjściowego strumienia świetlnego przy zmniejszaniu ϑ_{5k}^* aktywowanej powierzchni luminescencji. Finalnie granicą modelowania kolorymetrycznego CIE jest przypadek prześwietlenia wyłącznie części promieniowania pierwotnego przy całkowitym pominięciu fotoluminescencji

(rys.5i). Źródło - emiter półprzewodnikowy LED zasilany jest regulowanym A_{DAC} i modulowanym sygnałem PWM, gdzie czas luminescencji (poświaty) jest marginalny ($\tau_L = 10\mu s$) [8], względem badanych przebiegów prądowych I_Z podstaw czasowych (skala różnicy rzędu wielkości fizycznych).



Rys.5. Wizualizacja teoretyczna koncepcji modelowania długości czasu wypełnienia $\Delta L_E \rightarrow (\vartheta_{xL,TB})$ na zakres obszaru wzbudzenia fotoluminescencji oraz stopnia transmisji promieniowania emitera p-p LED 455 nm w zależności od zadanej nastawy parametru CCT

Obliczanie najbliższej temperatury barwowej CCT (tabela 2), zrealizowano na podstawie ustandaryzowanego algorytmu, działania numeryczne zapisano w programie. Natomiast danymi wejściowymi były bezwzględne rozkłady widmowe $G_{OUT}(\lambda)$ uzyskane na bazie serii pomiarów skalibrowanym spektromieterem OL-750 przy różnych konfiguracjach czasu wypełnienia ΔL_E (rys.6). Zaznaczona teoretyczna krzywa Plancka została wyliczona ze wzoru ogólnego oraz aproksymowana wielomianem 9-tego rzędu. Określono również przeliczony parametr $\Delta d(u,v)$ związany z odległością punktów chromatycznych $F(x,y)$, CIE(uv) od temperaturowego rozkładu ciała idealnie czarnego CCTuv.



Rys.6. Rodzina pomiarowych charakterystyk spektralnych oprawy SSL przy dwustopniowym przedziale konfiguracji nastaw CCT wraz z zarysem przesunięć kolorymetrycznych i ilustracją laboratoryjną.

Stwierdzono, że powyższa przedstawiona metoda regulacji prądowej I_Z o charakterze częstotliwościowo – kluczującej powoduje fluktuację strumienia świetlnego Φ_{OUT} . Wykonano kontrolny pomiar efektu stroboskopowego SVM przy kontrolnych wartościach uzyskiwanych najbliższych temperatur barwowych CCT dla zbudowanej oprawy oświetleniowej, celem oszacowania stabilności strumienia świetlnego w czasie [15]. Oszacowanie wskaźnika SVM bazowało na rozkładzie częstotliwościowym FFT sygnału tętnienia światła, według podanej normy IEC 61000-3-3. Wstępne wyniki przeprowadzonych pomiarów wskazują na spełnienie tego kryterium SVM < 1,0 (bardziej restrykcyjna wartość to 0,4). Fluktuacje strumienia zależą głównie od wysterowania ΔL_E , przy ustawionej najbliższej temperaturze barwowej CCT (szybkości przełączania podstawowej fali

nośnej) i znajdują się w dopuszczalnym zakresie przedziału dla standardowego obserwatora fotometrycznego CIE_x. Laboratoryjny wskaźnik SVM dla opisywanej oprawy SSL wynosił: 0,92 (2700 K*) – 0,68 (3600 K) do 0,98 (5000 K*).

Tabela 2. Zestawienie wyników pomiarów laboratoryjnych parametrów świetlnych źródła SSL, przy stabilizowanym strumieniu $\Phi_{OUT} \approx 30,0$ lm dla nastaw regulacji dwustopniowej: ΔL_E^{\pm} , A_{DAC}

CCT	A_{DAC}	CIE _x 1931	Δd [lm]	ΔL_E	$\Phi_1 + \Phi_2$ [lm]	SVM
2770 K*	1,0	0,454 ; 0,409	0,00022	450*	29,7 + 0,0	0,92
3627 K	0,38	0,396 ; 0,381	0,00261	900*	15,3 + 15,4	0,68
4132 K	0,54	0,374 ; 0,370	0,00143	600*	8,69 + 21,8	0,77
4974 K*	0,98	0,346 ; 0,356	0,00184	350*	0,0 + 30,12	0,98
5565 K	0,74	0,331 ; 0,331	0,00432	430*	29,9 + 0,23	0,91
7813 K	0,72	0,303 ; 0,286	0,01494	500*	29,5 + 0,73	0,86
9681 K	0,93	0,293 ; 0,269	0,01834	400*	29,1 + 0,96	0,95
11948 K	1,16	0,285 ; 0,258	0,02053	350*	29,2 + 1,16	1,02
18410 K	1,42	0,275 ; 0,242	0,02292	300*	28,7 + 1,42	1,13

Podsumowanie

Głównym celem pracy badawczej było opracowanie pewnej metody procesu modelowania rozkładu parametrów kolorymetrycznych oprawy SSL (najbliższej temperatury barwowej), wykorzystując pojedyncze monochromatyczne źródło półprzewodnikowe LED, współpracujące z wirującym wydzielonym luminoforem sektorowym. Teoretyczny zakres uzyskanych temperatur barwowych najbliższych CCT jest szerszy niż pomiarowy z powodu nieznacznego przenikania promieniowania wymuszającego do sąsiednich warstw luminoforów, szczególnie w obszarach krawędziowych. Przyjmując pewne uproszczenia takie jak przegrody dyfuzyjne, znacznie wyeliminowano przenikanie wzajemnie sekcji luminescencyjnych. Ponadto zastosowano mniejszą liczbę sekcji, kompensowaną wyższą liczbą obrotów wirnika oraz przedłużoną sztucznie sekcję matową T o znacznej absorpcji promieniowania niebieskiego, determinując tym poprawę parametru fluktuacji strumienia SVM.

Układ regulacji temperatury PID złącza emitera p-p LED 455 nm utrzymywał nastawę w przedziale od 25°C do 32°C, przy prądzie poniżej 1500 mA. Obligatoryjnie zastosowano zwłokę czasową w celu uniknięcia niestabilności regulacji objawiającej się rezonansem. Sterowanie amplitudą mocy źródła wymuszającego Z oparto o zewnętrzny przetwornik DAC. Prototypowy układ elektroniczny posiadał obwód mocy, sterujący amplitudą i kluczowaniem sygnału emitera LED, zrealizowany na pojedynczym bipolarnym tranzystorze NPN i wzmacniaczu operacyjnym ze sprzężeniem zwrotnym.

W przedwstępny procesie wykonanie docelowej matrycy mozaiki luminoforu sektorowego bazowało na mechanicznym złożeniu dwóch płaszczyzn materiału luminescencyjnego z usunięciem odpowiednich fragmentów obszarów tak, że były skonfigurowane naprzemianległe. Odzworowanie długości sekcji na warstwach bazowych podłoża wymagało precyzyjnego spasowania struktur, celem zachowania wymiaru okien transmisyjnych.

W omawianym rotującym dysku konwersyjnym, przyjęto stały asymetryczny podział czynnych rubryk powierzchni luminescencyjnych. Projektując wydruk matrycy wirnika zdefiniowano proporcję komórek zgodnie z zachowaniem stałego, możliwie maksymalnego strumienia świetlnego poszczególnej sekcji luminoforu oraz zminimalizowania tętnień strumienia świetlnego w dziedzinie czasu (tab. 2).

Diody elektroluminescencyjne LED [16] z możliwością przestrajalnej temperatury barwowej CCT są kluczowymi elementami w zastosowaniach oświetleniowych nowej generacji. Badania wykazały, że skorelowana temperatura barwowa (CCT) światła białego wpływa na aspekt cyklu okołodobowego człowieka (receptory zwojowe ipRGCs). W rezultacie regulowane źródła światła CCT zapoczątkują podwaliny nowoczesnych systemów oświetleniowych [17].

Niniejszy artykuł został sfinansowany ze środków pracy zespołowej PB zarejestrowanej pod numerem: WZ/WE-IA/3/2023.

Autorzy: dr inż. Mateusz Prorok, Wydział Elektryczny Politechniki Białostockiej, Katedra Fotoniki, Elektroniki i Techniki Świetlnej, 15-351 Białystok, ul. Wiejska 45D, E-mail: m.prorok@pb.edu.pl

LITERATURA

- [1] Ye S., Xiao F., Pan Y.X., Ma Y.Y., Zhang Q.Y., Phosphors in phosphor-converted white light-emitting diodes: Recent advances in materials, techniques and properties, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, (2010) Vol. 71, Issue 1, 1-34
- [2] Zhu Q.-Q., Xu X., Wang L., Tian Zi.-F., X, Y.-Z., Hirotsaki N., Xie R.-J., A robust red-emitting phosphor-in-glass (PiG) for use in white lighting sources pumped by blue laser diodes, *Journal of Alloys and Compounds*, (2017) Vol. 702, 193-198
- [3] Hu N.-C., Feng Y.-C., Wu C.C., Hsiao S.L., Optimal radiant flux selection for multi-channel light-emitting diodes for spectrum-tunable lighting, *Lighting Research & Technology*, (2014) Vol. 46, Issue 4, 434-452.
- [4] Lipnitskaya S., Mynbaev K., Nikulina L., Kramnik V., Bougrov V., Kovsh A., Odnoblyudov M., Romanov A., Investigation of light extraction from light emitting module chip-on-board, *Optical Review*, (2014) Vol. 21, No. 5, 655-658
- [5] Dutta P. S., Liotta K. M., Full Spectrum White LEDs of Any Color Temperature with Color Rendering Index Higher Than 90 Using a Single Broad-Band Phosphor, *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, (2018) 7 (1), 3194-3198
- [6] Chi Y., Improvement of the blue-color quenching and optical efficiency of laser for the head-up display, *Journal of Information Display*, (2017) Vol. 18, No. 1, 41-47
- [7] Zhuang Y., Li C., Liu C., Fu Y., Shi Q., Liang Y., Xia L., High-efficiency YAG:Ce³⁺ glass-ceramic phosphor by an organic-free screen-printing technique for high-power WLEDs, *Optical Materials*, (2020) Vol. 107, No. 110118
- [8] Dane katalogowe luminoforu, *Intematix ChromaLit Remote Phosphor Light Source*
- [9] Maniquiz M. C., Jung K. Y., Jeong S. M., Luminescence Comparison and Enhancement of Ce-doped Yttrium Aluminum Garnet Phosphor via Cation Substitution and Adding Flux, *Journal of The Electrochemical Society*, (2011) Volume 158, Number 7, 697-703
- [10] Ahn Y. N., Kim K. D., Anoop G., Kim G. S., Yoo J. S., Design of highly efficient phosphor-converted white light-emitting diodes with color rendering indices ($R_1 - R_{15}$) ≥ 95 for artificial lighting, *Scientific Reports*, (2019) 9, No. 16848, 1-10
- [11] Lokeswara Reddy G.V., Rama Moorthy L., Chengaiah T., Jamalajah B.C., Multi-color emission tenability and energy transfer studies of YAl₃(BO₃)₄:Eu³⁺/Tb³⁺ phosphors, *Ceramics International*, (2014) 40 (2), 3399-3410,
- [12] Solodovnyk A., Forberich K., Stern E., Krč J., Topič M., Batentschuk M., Lipovšek B., Brabec C. J., Highly transmissive luminescent down-shifting layers filled with phosphor particles for photovoltaics, *Optical Materials Express*, (2015) Vol. 5, Issue 6, 1296-1305
- [13] Lee D.-H., Kim S., Kim H., Lee S.-K., Highly Efficient and Highly Conductive Phosphor-in-Glass Materials for Use in LD-Driven White-Light Lamp, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, (2019) vol. 6, No. 2, 293-303.
- [14] Halima A. B., Araoud Z., Canale L., Charrada K., Zissis G., Energy efficiency of a LED lighting system using a Peltier module thermal converter, *Case Studies in Thermal Engineering*, (2022) Volume 34, No. 101989
- [15] Perz M., Sekulovski D., Vogels I., Heynderickx I., Stroboscopic effect: contrast threshold function and dependence on illumination level, *Journal of the Optical Society of America A* (2018) Vol. 35, Issue 2, 309-319
- [16] Zhang R., Wen Z., Li B., Liang S., Yang M., Xia Z., Research on COB-LED light source with tunable CCT based on screen printing and flip chip technology, *Optical and Quantum Electronics*, (2022) Vol. 54, Issue 2, No. 79
- [17] Wong N. A., Bahmani H., A review of the current state of research on artificial blue light safety as it applies to digital devices, *Heliyon*, (2022) Volume 8, Issue 8, No. e10282