

Analiza możliwości dynamicznej zmiany parametrów kolorymetrycznych układu świetlnooptycznego współpracującego z wydzielonym luminoforem

Streszczenie. Światło barwy białej powstaje w oparciu o luminescencję wzbudzoną promieniowaniem niebieskich emiterów półprzewodnikowych. W celu uzyskania wysokiej sprawności konwersji długość fali promieniowania pierwotnego dobiera się do maksimum absorpcji materiału luminescencyjnego. Nieznaczna zmiana charakteru widma promieniowania wymuszającego skutkuje przesunięciem odpowiedzi spektralnej luminoforu. Zatem pojawiają się możliwości wpływania na parametry kolorymetryczne światła białego. Promieniowanie wzbudzające luminescencję utworzone z szeregu źródeł półprzewodnikowych (nUV-VIS) pokrywa pełny przedział absorpcji dla luminoforu domieszkowanego cerem i europem. W artykule przedstawiono wyniki pomiarów spektralnych strumienia świetlnego wyjściowego, kolorymetrycznych oraz sprawności konwersji luminoforu wykorzystując rozszerzony układ wzbudzenia fotoluminescencji oparty na niezależnym sterowaniu kilku dobranych emiterów półprzewodnikowych.

Abstract. The white color light is created utilizing luminescence excited by blue semiconductor emitters radiation. To achieve high conversion efficiency, length of the primary radiation wave is matching up with the maximal absorption of luminescent material. Slight change of forcing radiation spectrum nature results in phosphor's spectral answer shift. Therefore, it is possible to affect the white light's colorimetric parameters. Forcing radiation, created by row of semi-conductor sources (nUV-VIS), covers full absorption interval for phosphor doped with cerium and europium. In the paper were presented the results of output light stream spectral measurements, colorimetric measurements and the phosphor conversion efficiency measurements, using extended photoluminescence excitation system, basing on independent control of few selected semi-conductor emitters. (The analysis of colorimetric parameters dynamic changes capabilities for optical-illumination system cooperating with isolated phosphor).

Słowa kluczowe: luminofor, LED, luminescencja, kolorymetria, temperatura barwowa.

Keywords: phosphor, LED, luminescence, colourimetry, colour temperature.

Wstęp

Współczesne źródła światła wyposażone w układy regulacji parametrów kolorymetrycznych (tj. najbliższa temperatura barwowa CCT, wskaźnik oddawania barw Ra) oparte są na matrycy złożonej z kilku niezależnych quasi-monochromatycznych emiterów półprzewodnikowych sprzężonych ze wspólnym układem optycznym, pełniącym funkcję mieszacza barw. Takie rozwiązanie pozwala na osiągnięcie wysokiej sprawności oraz szerokiego zakresu regulacji parametrów spektrofotometrycznych, pokrywając większość obszaru przestrzeni barw CIE XYZ 1931 [1].

Charakterystyka spektralna strumienia wyjściowego nie jest ciągła, lecz jest efektem złożenia widm składowych poszczególnych emiterów [1]. Problematyczne staje się wówczas utrzymanie wysokiego skorelowanego wskaźnika oddawania barw Ra (CRI), jak również stabilizacja wartości strumienia świetlnego [1]. Luminofory stosowane w białych emiterach półprzewodnikowych oparte są zazwyczaj na bazie $Y_3Al_5O_{12}$ (YAG), $Lu_3Al_5O_{12}$ (LuAG), oraz $Tb_2Mo_3O_{12}$ (TM) domieszkowane pierwiastkami ziem rzadkich Ce, Eu, Pr, czy Sm [2]. Absorpcja materiału luminescencyjnego leży w zakresie promieniowania barwy niebieskiej lub bliskiego nadfioletu [2,3,4]. Widmo emisyjne luminoforu determinuje mechanizm przejść energetycznych wzbudzonych jonów aktywatora (ceru, europu czy samaru), powodując ciągłe widmo w zakresie 500 nm - 780 nm [2,3,4]. Znamionowa najbliższa temperatura barwowa luminoforu CCT zależy głównie od grubości próbki materiału luminescencyjnego, stopnia domieszkowania molowego oraz składu domieszki [3]. Bezpośrednio wpływając na udział barwy niebieskiej względem odpowiedzi widma fotoluminescencji, zachowując tym samym stałą i względnie wysoki wskaźnik oddawania barw (Ra > 80) oraz znamionową CCT wynikowego strumienia świetlnego, niezależnie od wartości padającej mocy promienistej [4].

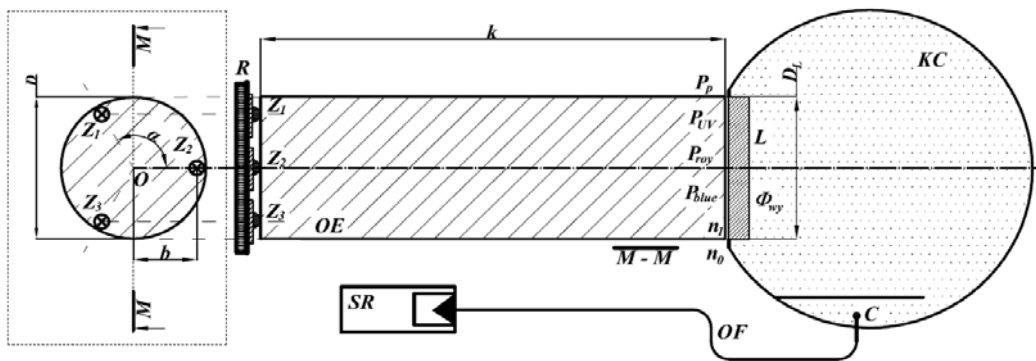
Luminofor charakteryzują się pewną bezwładnością świetlną tzw. fosforescencją, (stałą czasową τ_L , zaniku poświaty) zależną głównie od rodzaju aktywatora, która wynosi $\tau_{Ce} = 100$ ns dla ceru [5] oraz ponad $\tau_{Eu} = 850$ μ s dla europu [2]. Stopień stężenia domieszkowania molowego pierwiastków ziem rzadkich do struktury podłoża luminoforu ma nieznaczny wpływ w wartość inercji fosforescencji [2,5].

Założenia układu świetlnooptycznego

Zmiana najbliższej temperatury barwowej luminoforu może być zrealizowana, również poprzez aktywowanie fotoluminescencji odpowiednim widmem promieniowania z szerszego zakresu niż dedykowany (tj. 380 nm – 520 nm). Układ wzbudzenia z regulacją charakterystyki spektralnej zrealizowano w układzie wielo-emiterowym dobierając źródła z zakresu (n-UV – VIS) współpracujące (sprzężone) z przewodniczą optyczną, pełniącą rolę naświetlacza oraz mieszacza spektralnego.

Długość k przewodnicy optycznej wykonanej z szkła akrylowego (PMMA) o współczynniku załamania $n_1 = 1,49$ (dla 450nm) jest dobrana tak, aby zapewnić możliwie wysoki poziom równomierności rozkładu mocy promienistej P_p padającej na powierzchnię materiału luminoforu przy każdym ze składowych emiterów półprzewodnikowych [6].

Rozszerzony układ wzbudzenia zrealizowano na trzech emiterach półprzewodnikowych ($Z_1 = 400$ nm, $Z_2 = 455$ nm, $Z_3 = 472$ nm) umieszczonych symetrycznie na wspólnym radiatorze (rys.1). Znacznie przewymiarowany element odprowadzający ciepło R pozwolił na ograniczenie przesunięcia spektralnego w wyniku gwałtownego wzrostu temperatury złącza, na skutek zmian wartości prądu zasilającego źródło promieniowania [3,7]. Sterowanie mocą poszczególnych emiterów sprokurowano przez niezależne zasilanie, regulując doborem wartości stabilizowanego prądu stałego, płynącego przez złącze półprzewodnikowe.



Rys.1. Schemat blokowy badanego uklad pomiarowego

gdzie: *EO* – przewodnica optyczna (mieszcza), *L* – luminofor, *KC* – pomiarowa kula całkująca, *R* – element rozpraszający ciepło z emiterów, *C* – czoło wejściowe światłowodu pomiarowego, *SR* – spektro-radiometr, *Z_{1,2,3}* – źródła półprzewodnikowe, *P_{UV,blue,roy}* – składowa moc promienista z poszczególnych emiterów, *OF* – światłowód pomiarowy, *D* – średnica przewodnicy, *P_p* – wypadkowa moc promieniowania padająca na luminofor, Φ_{wy} – strumień świetlny wyjściowy, *[M-M]* – przekrój wzdłużny przewodnicy optycznej

Przedstawione rozważania sugerują, że zastosowanie standardowego zasilania PWM (regulacja wypełnieniem impulsów), gdzie czas przełączeń porównywalny jest z całkowitym czasem zaniku fosforescencji (3 - 5 τ_L), może prowadzić do zmiany parametrów kolorymetrycznych układów świetlnooptycznych sprzężonych z luminoforami (LED-y białe) w zależności od stopnia ich wysterowania PWM [8]. Nakładanie się stałej poświaty widma fotoluminescencji na modulowane w dziedzinie czasu źródło promieniowania wymuszającego powoduje pozorną zmianę charakterystyki spektralnej strumienia wyjściowego, w zależności od współczynnika wypełnienia impulsów.

Oko ludzkie uśrednia tak szybko w czasie zmiany rozkładu widmowego źródła doprowadzając do ich względnego wymieszania [9]. Następstwem tego zjawiska jest ekwiwalentny sygnał optyczny mierzony z czasem całkowania równym częstotliwości zanikowej oka (10 ms).

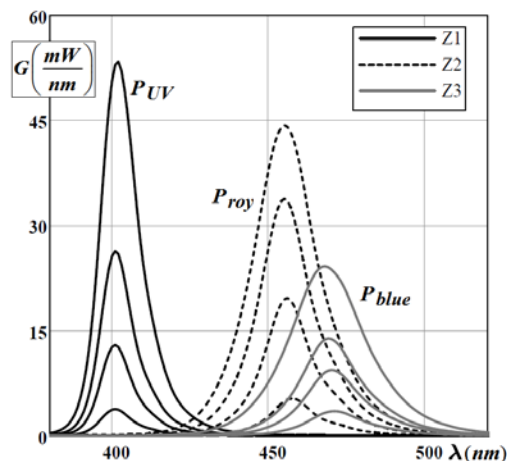
W wyniku lokalnych niejednorodności współczynnika załamania n_1 oraz odkształceń krzywej indyktrysu (dwójłomność) w wewnętrznej strukturze materiału optycznego, część doprowadzonej mocy optycznej emitowana jest również powierzchnią boczną, co bezpośrednio przekłada się na obniżenie sprawności przewodnicy optycznej [10]. Wiązka świetlna propagująca się w torze ulega również znacznemu rozproszeniu (Rayleigha) na skutek czynników pasożytniczych tj. zanieczyszczenia struktury sieci krystalicznej materiału optycznego, makro i mikro zgięcia oraz pewna niezerowa chropowatość powierzchni bocznej [11]. Te niekorzystne czynniki poprawiają jednak stopień wymieszania promieniowania z poszczególnych emiterów półprzewodnikowych. Aspekt sprawności układu nie jest tutaj rozważany, lecz analizowana jest sprawność konwersji samego luminoforu, biorąc pod uwagę moc optyczną wynikową, padającą na materiał luminescencyjny.

Metodyka pomiarów układów jedno-emiterowych

Przedstawiony układ pomiarowy (rys.1) pozwala na oszacowanie odpowiedzi spektralnej luminoforu na wymuszenie złożone ze składowych widm emisyjnych trzech źródeł pierwotnych. Sterowanie promieniowaniem padającym na powierzchnię luminescencyjną odbywa się w ograniczonym zakresie, zdeterminowanym zachowaniem kształtu widma w zależności od mocy optycznej, (brak widoczných przesunięć spektralnych) [7].

Spektrum emisyjne źródła półprzewodnikowego jest quasi-monochromatycznym promieniowaniem o szerokości połówkowej w przedziale od 30 nm do nawet 80 nm (zależne od parametrów złącza i długości fali dominującej).

Szerokość spektralna pasma jest stała i nie zależy od mocy promienistej emitowanej przez źródło. W analizowanym przypadku skutkuje to wzajemnym nakładaniem się widm sąsiednich emiterów półprzewodnikowych (rys.2).



Rys.2. Pełny zakres sterowania składowych spektralnych mocy wyjściowej P_p przewodnicy we wspólnym układzie wzbudzenia

Całkowita moc promienista padająca na powierzchnię luminoforu jest całką po bezwzględnym rozkładzie spektralnym w rozpatrywanym przedziale (wzór 1), pokrywającym się z absorpcją badanego luminoforu.

$$(1) \quad P_p = \int_{380}^{520} \frac{n}{40} G(\lambda) d\lambda$$

gdzie: n – pomiarowa stała czasowa całkowania [ms], $G(\lambda)$ – gęstość mocy promienistej, λ – długość fali [nm].

Zakres pomiarowy przyrządu został sztucznie zwiększony poprzez zmianę stałej czasowej całkowania sygnału pomiarowego.

Ograniczono również w ten sposób obszar nasycenia matrycy CCD oraz znacznie wyeliminowano przypadkowy szum pomiarowy. Domyślna zalecana przez producenta kalibracja spektro-radiometru wynosiła 40 ms.

Analogicznie obliczona suma składowych mocy czynnej trzech emiterów jest równa: $P_{UV} = 888$ mW, $P_{roy} = 1262$ mW oraz $P_{blue} = 798$ mW. Całkowita dostępna moc optyczna P_p padająca na luminofor w tym układzie nie przekracza 3 W.

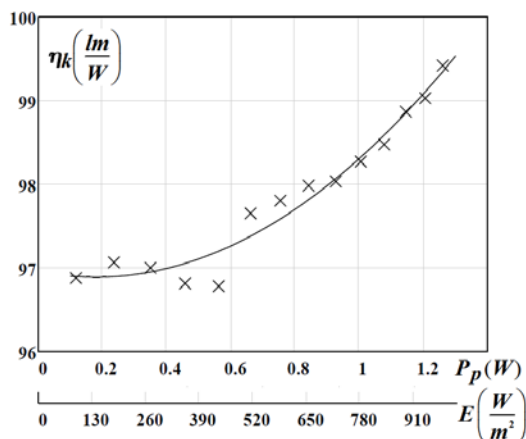
Poszczególne zadane rozbieżności maksymalnej mocy optycznej wynikają głównie z innego stopnia sprzężenia (źródło - czoło przewodnicy) [10,12] oraz z różnej sprawności

kwantowej poszczególnych emiterów p-p. Dodatkowym czynnikiem jest nieliniowa tłumienność materiału toru optycznego [11]. Mimo tego, poprzez regulację wartością prądu poszczególnych źródeł, można znormalizować moc optyczną względem emitera najmniej wydajnego Z_3 .

Oszacowanie stopnia sprawności konwersji materiału luminescencyjnego η_k jest wyrażone jako zależność mocy padającej P_p do odpowiedzi w postaci strumienia świetlnego wyjściowego Φ_{wy} . Pomiar dokonany w przedstawionym układzie dotyczy wydajności przemiany przy uwzględnieniu jednostronnej emisji strumienia świetlnego luminoforu oraz nieznacznej emisji powierzchnią krawędziową.

Luminofor emituje również nieznaczny ilość światła w kierunku anormalnym, w wyniku silnego rozpraszania Mie oraz odbić Fresnelowskich [10]. Prowadzi to do zniżenia rzeczywistej sprawności konwersji materiału aktywnego optycznie. Część strumienia fotoluminescencji kierowanego w stronę źródła wymuszającego zostaje bezpowrotnie utracona. Analogiczna sytuacja ma miejsce w typowych rozwiązaniach LED (np. Chip on Board). Płytkę luminoforu posiada odpowiednie warstwy powłok galwanicznych ograniczające „cofanie się wstecznie” światła po konwersji poprzez wprowadzenie niejednorodnych gradientów w koncentracji domieszek, wewnątrz struktury materiału [13].

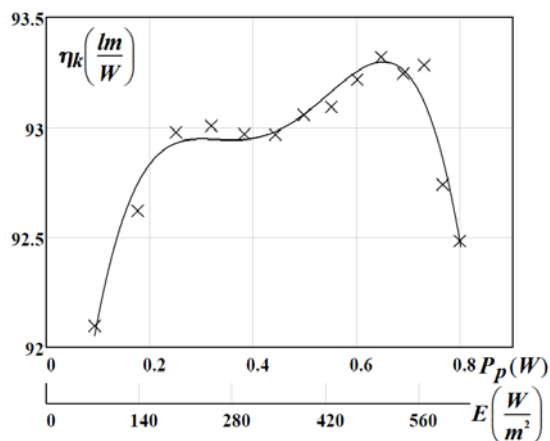
Wyznaczona w ten sposób sprawność konwersji luminoforu (rys.3,4,5) zmienia się o niecałe 2% w badanym przedziale mocy. Charakterystykę można również wyrazić w skali przeliczonej względem panującego na powierzchni natężenia napromienienia E . Stała powierzchnia czynna luminoforu w badanym układzie pomiarowym wynosiła: $1,26 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$, ($D_L = 40 \text{ mm}$).



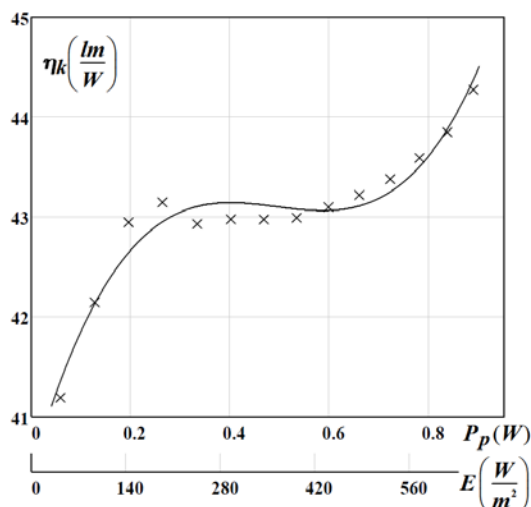
Rys.3. Sprawność konwersji luminoforu w zależności od natężenia napromienienia E (mocy optycznej P_p) dla promieniowania wymuszającego 455 nm

Największą wydajność luminoforu uzyskano dla długości fali dedykowanej równej 455 nm. Sprawność konwersji maleje wraz z przesunięciem spektralnym promieniowania wymuszającego względem podstawowego.

Mierzony strumień świetlny wyjściowy uwzględnia również światło przepuszczone przez materiał luminescencyjny, pochodzące bezpośrednio od źródła pierwotnego. W przypadku emiterów niebieskich strumień nadwyżkowy nie będący wynikiem fotoluminescencji (nie ulegający konwersji w materiale) wynosi około 2,5% (455 nm) oraz 8% (472 nm). Analogiczny przypadek wykorzystania jako wzbudzenie promieniowania n-UV, które praktycznie nie wnosi dodatkowego strumienia świetlnego (poniżej 0,4%) jednak jest transmitowane przez luminofor. Determinuje wzrost gęstości mocy optycznej w zakresie (niewidzialnym) nadfioletowym i powoduje narażenie fotobiologiczne.



Rys.4. Sprawność konwersji luminoforu w zależności od natężenia napromienienia E (mocy optycznej P_p) dla promieniowania wymuszającego 472 nm



Rys.5. Sprawność konwersji luminoforu w zależności od natężenia napromienienia E (mocy optycznej P_p) dla promieniowania wymuszającego 400 nm

Emitory półprzewodnikowe szeroko wykorzystywane w technice świetlnej jako tzw. niebieskie diody LED emitują promieniowanie w dość szerokim zakresie spektralnym. Jednak najkorzystniejszy obszar pracy badanego materiału luminescencyjnego ogranicza się definitywnie do pasma z przedziału 450 - 460 nm, dlatego źródła półprzewodnikowe oprócz dopasowania maksimum gęstości spektralnej na długość fali środkowej 455 nm, powinny również zapewnić możliwe wąskie pasmo emitowanego widma wzbudzenia.

Metodyka pomiarów układów wielo-emiterowych

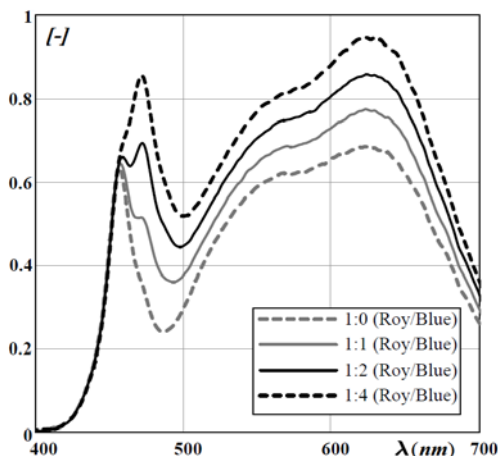
Układ świetlno-optyczny z możliwością sterowania widmem wymuszającym fotoluminescencję pozwala pośrednio wpływać na kształt charakterystyki spektralnej strumienia świetlnego wynikowego. Pojawiają się możliwości zarówno dynamicznego sterowania temperaturą barwową światła, jak też jednoczesnym utrzymaniem względnie wysokiego wskaźnika oddania barw R_a (75 - 94 dla całego zakresu regulacji).

Przeprowadzono szereg pomiarów analizując wszystkie możliwe korelacje mocy optycznej trzech dostępnych źródeł półprzewodnikowych. Priorytetowe znaczenie miało uzyskanie największego zakresu sterowalności najbliższą temperaturą barwową CCT, przy zachowaniu możliwie wysokiej sprawności konwersji luminoforu. Optymalnym rozwiązaniem okazało się wykorzystanie zalety pary emiterów ($P_{roy} + P_{UV}$ oraz $P_{roy} + P_{blue}$). Korzystne jest użycie źródła dedykowanego ze względu na najwyższą sprawność

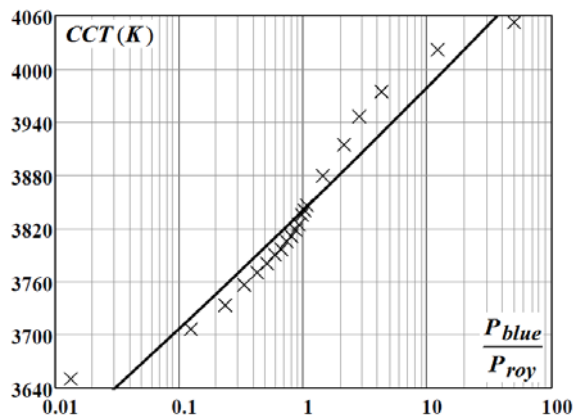
przemiany (fotoluminescencji), zaś zmianę parametrów kolorymetrycznych kompletnego układu osiągnięto poprzez zwiększenie udziału promieniowania z dodatkowych źródeł (P_{roy} lub P_{blue}). Dodanie promieniowania z zakresu n-UV skutkowało znacznym spadkiem wydajności konwersji materiału luminescencyjnego oraz obniżeniem temperatury barwowej światła wyjściowego. Natomiast zwiększenie CCT realizowano poprzez addytywny wzrost mocy w pasmie barwy niebieskiej 470 – 480 nm.

Zaprezentowana rodzina pomiarów charakterystyk spektralnych (rys.6) znormalizowana została względem punktu maksymalnej gęstości mocy dla 455 nm (stała wartość odniesienia). Celem takiego zabiegu jest określenie zmiany kształtu widma luminescencji pod wpływem dodawania czynnika w postaci promieniowania o innej długości fali (np. źródła półprzewodnikowego 472 nm).

Przedstawione krzywe informują o tym, że wraz ze zwiększaniem udziału czynnika mocy optycznej emitera dodatkowego (sterującego), w widmie pojawia się składowa pochodząca bezpośrednio od źródła pierwotnego, która nie ulega zmianie w wyniku procesu fotoluminescencji (zostaje przepuszczona przez próbkę). Spektrum odpowiedzi luminoforu (500 nm – 780 nm) na omawiane wymuszenie nie powoduje przesunięć ani odkształceń widma. Wzrasta jedynie moc optyczna układu spowodowana adekwatnym zwiększeniem mocy czynnika wymuszającego.



Rys.6. Względne charakterystyki spektralne odpowiedzi luminoforu na wymuszenie złożone z dwóch emiterów (455 nm oraz 472 nm) względem stopnia ich wzajemnej korelacji mocy promienistej

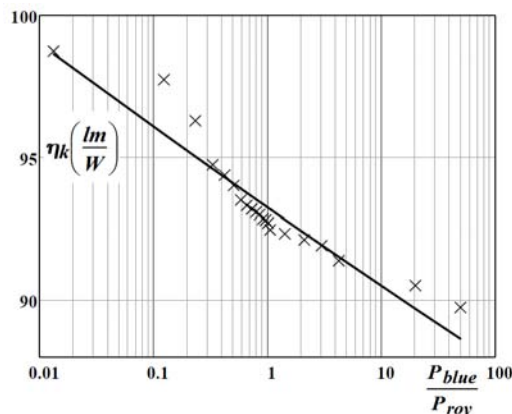


Rys.7. Najbliższa temperatura barwowa strumienia świetlnego wyjściowego dla wymuszenia złożonego z dwóch różnych emiterów (455 nm oraz 472 nm) w zależności od stopnia ich korelacji

Na podstawie analizy dokonanych pomiarów określano parametry kolorymetryczne (rys.7). Najbliższa temperatura

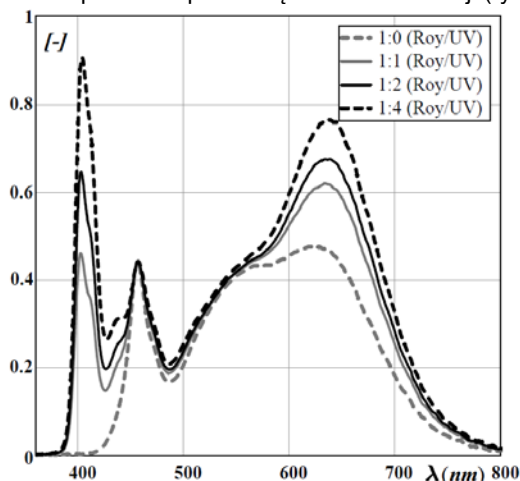
barwowa CCT ulega wykładniczemu zwiększeniu na skutek dodawania promieniowania z zakresu barwy niebieskiej. Dla przedziału proporcji mocy P_{blue} / P_{roy} (0,01 – 1,50), nieznacznej poprawie ulega również wskaźnik oddawania barw R_a (z 92 do prawie 95). Następnie dalsze skalowanie korelacji między emiterami półprzewodnikowymi powoduje dynamiczny spadek wskaźnika aż do wartości $R_a = 84$ (pełne wystrojenie mocy źródła dodatkowego P_{blue}).

Wyznaczoną zależność sprawności konwersji materiału luminescencyjnego zaproksymowano funkcją wykładniczą (rys.8). Poprzez zmieszanie sąsiednich promienników emiterowych na długości fali 455 nm oraz 472 nm w różnej proporcji mocy optycznej poszerzono pasmo spektralne wymuszenia. Doprowadzając do obniżenia wypadkowej skuteczności świetlnej układu świetlnooptycznego w analizowanej konfiguracji z wydzielonym luminoforem.



Rys.8. Sprawność konwersji luminoforu dla wymuszenia złożonego z dwóch emiterów (455 nm oraz 472 nm) w zależności od stopnia ich wzajemnej korelacji mocy promienistej

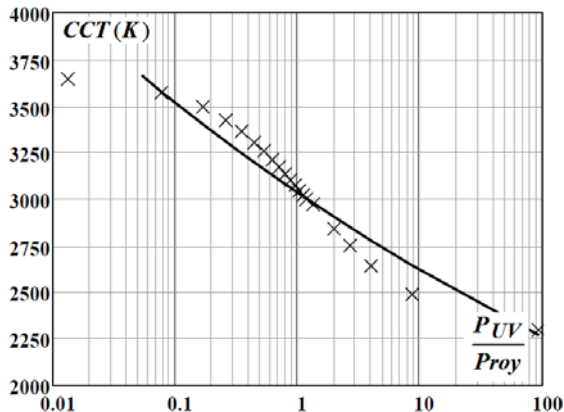
Przypadek wykorzystania emitera półprzewodnikowego z zakresu n-UV jako źródła dodatkowe ma na celu określenie wpływu na parametry kolorymetryczne światła. Wówczas wyznaczono serię charakterystyk spektralnych względem stopnia wzajemnego udziału mocy promienistej. Zwiększając proporcję na rzecz źródła n-UV modyfikowano pośrednio odpowiedź spektralną fotoluminescencji (rys.9).



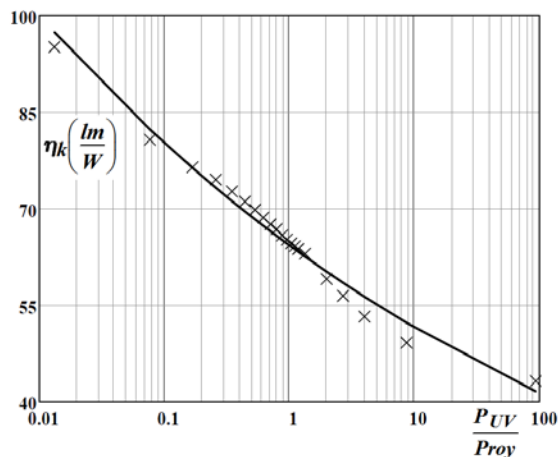
Rys.9. Względne charakterystyki spektralne odpowiedzi luminoforu na wymuszenie złożone z dwóch emiterów (455 nm oraz 400 nm) w zależności od stopnia ich wzajemnej korelacji mocy promienistej

Uzyskano możliwość obniżania najbliższej temperatury barwowej strumienia wyjściowego poprzez zwiększenie udziału pasma widma w zakresie barwy czerwonej 630 nm [14], będącego wynikiem konwersji na wymuszenie źródłem

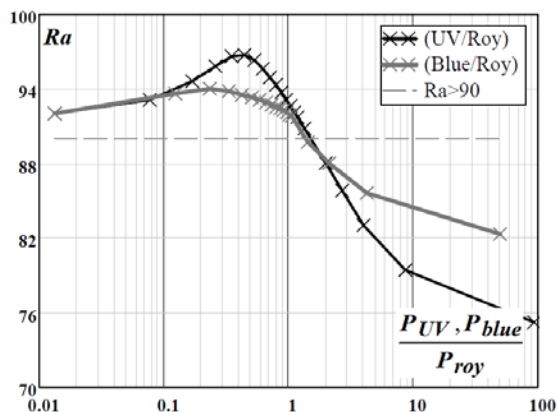
półprzewodnikowym n-UV (rys.10). Wraz z pojawieniem się szerszych możliwości regulacji CCT znacząco spada sprawność przemiany świetlnej luminoforu, która jest szczególnie niekorzystna dla zakresu z przewagą udziału promieniowania nadfioletowego w widmie wymuszającym proces fotoluminescencji (rys.11).



Rys.10. Najbliższa temperatura barwowa strumienia świetlnego wyjściowego dla wymuszenia złożonego z dwóch różnych emiterów (455 nm oraz 400 nm) w zależności od stopnia ich korelacji



Rys.11. Sprawność konwersji luminoforu dla wymuszenia złożonego z dwóch emiterów (455 nm oraz 400 nm) w zależności od stopnia ich wzajemnej korelacji mocy promienistej



Rys.12. Zależność wskaźnika Ra (CRI) dla analizowanych układów wymuszających złożonych z pary emiterów (455 nm + 472 nm oraz 455 nm + 400 nm) w zależności od stopnia ich wzajemnej korelacji

Nieuzasadniony jest więc jednoczesny wspólny udział promieniowania emiterów dodatkowych, gdyż działanie ich na wynikową wartość najbliższej temperatury barwowej jest przeciwne.

Wskaźnik oddawania barw, jak również w poprzednim przypadku ulega zwiększeniu, poprzez dodanie udziału promieniowania z zakresu 400 nm, lecz tylko w określonym wąskim obszarze badań (0,01 do 1,5). Największą wartość poprawy wskaźnika $Ra = 97$ uzyskano dla proporcji 0,45. Zaś przy dalszym zwiększaniu udziału promieniowania emitera z bliskiego nadfioletu wskaźnik oddawania barw spadał wykładniczo aż do ustalonej wartości 75 (rys.12).

Pojedynczy a zarazem uniwersalny parametr kolorymetryczny nie daje obiektywnej oceny poprawności oddawania barwy w percepcji wzrokowej. Międzynarodowa Komisja Oświetleniowa przedstawiła wzbogaconą procedurę interpretowania wskaźników parametrów świetlnych dając rozszerzone informacje o parametrach jakościowych światła [15].

Podsumowanie

Badany materiał luminescencyjny uzyskuje najlepszą wydajność konwersji oraz stosunkowo wysokie parametry kolorymetryczne dla źródła dedykowanego 450 – 460 nm (royal-blue). Każda zmiana długości fali promieniowania wymuszającego wpływa na wartość najbliższej temperatury barwowej strumienia świetlnego o $\Delta CCT = 1750$ K, kosztem istotnych parametrów świetlnych (tj. η_k , Ra). Szczególnie niezalecane jest więc zastosowanie układu świetlno-optycznego z pojedynczym niededykowanym emitery półprzewodnikowym w celu zmiany statycznej parametrów kolorymetrycznych światła białego.

Sterowanie uzyskane poprzez rozszerzenie źródła pierwotnego o układ wielo-emiterowy zapewnia dynamiczną i ciągłą regulację periodu parametrów kolorymetrycznych. Sterowanie polega na jednoczesnym załączeniu tylko pary emiterów (dobierając stosunek ich mocy promienistej), co przyczynia się również do poprawy warunków chłodzenia.

Ograniczając zakres zmiany temperatury barwowej do ($\Delta CCT = 900$ K) uzyskano stabilizację wysokiego wskaźnika oddawania barw ($Ra > 90$) [16] przy sprawności luminoforu sięgającej 98,2 – 63,3 lm/W. W przypadku wymogów normy oświetlenia wnętrz PN-EN 12464-1:2012 ($Ra > 80$) zakres regulacji rozciągnąłby się znacznie dalej (nawet do 1400 K).

Możliwe jest również poszerzenie przedziału wpływu na parametry jakościowe światła białego poprzez ograniczenie się do fizycznej wymiany (realizacja elektromechaniczna) próbki materiału luminescencyjnego.

Całkowita wydajność świetlna prezentowanego układu jest iloczynem sprawności konwersji luminoforu oraz funkcją stopnia dopasowania toru optycznego, jak również wydajności kwantowej użytych źródeł półprzewodnikowych. Rozważany tutaj schemat świetlno-optyczny realizujący możliwość zauważalnej dynamicznej regulacji parametrów kolorymetrycznych, charakteryzuje się wypadkową niską skutecznością świetlną na poziomie 20 – 30 lm/W, lecz spełnia wysokie wymagania jakościowe dla światła białego. Mianowicie analiza eksperymentu opisywana w artykule ogranicza się wyłącznie do aspektu ściśle związanego z obszarem pracy materiału luminescencyjnego.

Sprawność konwersji luminoforu nie zależy od wartości mocy wymuszającej fotoluminescencję [13]. Obserwowane fluktuacje w pomiarach (2% odchylenia od wartości średniej) są wynikiem niestabilnej temperatury luminoforu, pośrednio zależnej od wartości mocy padającej P_p zaabsorbowanej w materiale [13].

Badana próbka luminescencyjna wykazuje tylko emisję spontaniczną (brak wzmocnienia optycznego), co znacznie ogranicza sterowanie wyjściową charakterystyką spektralną poprzez uzupełnienie układu o dodatkowe emitery leżące w zakresie emisji luminoforu (500 nm – 780 nm). W tym parnieaktywnym obszarze pracy możliwe jest wyłącznie prześwietlenie materiału w celu bezpośredniego wpływania

na widmo wyjściowe. Jednak takie rozwiązanie wiąże się ze znacznym ograniczeniem sprawności optycznej układu (współczynnik transmitancji promieniowania $T_L = 0,2 - 0,4$ dla VIS). Z powodu silnego rozpraszania w strukturze materiału oraz braku zmiany rozkładu spektralnego w tym zakresie, luminofor pełni funkcję niewydajnego dyfuzora optycznego.

Rozwiązaniem przedstawionej metody sterowania parametrami barwnymi światła białego jest możliwość zaimplementowania kropek kwantowych lub wykorzystania jeszcze nisko sprawnych luminoforów bazujących na wymianie (transferze) energii między różnymi domieszkami aktywatora [2,17]. Obszar absorpcji takiego materiału rozciągałby się wówczas przez całe spektrum VIS, znacznie poszerzając możliwości regulacji.

Tor optyczny w postaci walcowej prowadnicy optycznej bezpośrednio przenosi pełne widmo promieniowania z monochromatycznych emiterów półprzewodnikowych, nie wprowadzając znacznych dyspersji i przesunięć spektralnych mocy padającej na powierzchnię aktywną luminoforu [18].

Artykuł został zrealizowany w Katedrze Elektroenergetyki, Fotoniki i Techniki Świetlnej Politechniki Białostockiej, oraz W Katedrze Zarządzania i Inżynierii Produkcji. Badania zostały zrealizowane w ramach pracy MB/WE/5/2015 oraz S/WZ/1/2015 i sfinansowane ze środków na naukę MNiSW

Autorzy: Prof. PB dr hab. inż. Maciej Zajkowski, Politechnika Białostocka, Wydział Zarządzania, Katedra Zarządzania Produkcją, 16-001 Kleosin, ul. Ojca Tarasiuka 2, E-mail: m.zajkowski@pb.edu.pl; Mgr inż. Mateusz Prorok, studia doktoranckie Wydziału Elektrycznego Politechniki Białostockiej, Katedra Elektroenergetyki, Fotoniki i Techniki Świetlnej, 15-351 Białystok, ul. Wiejska 45d E-mail: m.prorok@doktoranci.pb.edu.pl

LITERATURA

- [1] Hu N., Feng Y., Wu C., Hsiao S., Optimal radiant flux selection for multi-channel light-emitting diodes for spectrum-tunable lighting, *Lighting Research & Technology*, Vol. 46, Issue 4, 434-452, (2014)
- [2] Baur F., Glocker F., Jüstel T., Photoluminescence and energy transfer rates and efficiencies in Eu^{3+} activated $\text{Tb}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$, *Journal of Materials Chemistry C*, Vol. 3, Issue 9, 2054-2064, (2015)
- [3] Liu Z., Liu S., Wang K., Luo X., Status and prospects for phosphor-based white LED Packaging, *Frontiers of Optoelectronics in China*, Vol. 2, Issue 2, 119-140, (2009)
- [4] Xiebing W., Xiaosong Y., Wanwan L., Kang S., Doped Quantum Dots for White-Light-Emitting Diodes Without Reabsorption of Multiphase Phosphors, *Advanced Materials*, Vol. 24, Issue 20, 2742-2747, (2012)
- [5] Ding X., Geng W., Wang Q., Wang Y., Structure, luminescence property and abnormal energy transfer behavior of color-adjustable $\text{Ca}_3\text{Hf}_2\text{SiAl}_2\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}\text{Mn}^{2+}$ phosphors, *RSC Advances*, Vol. 5, Issue 119, 98709-98716, (2015)
- [6] Prorok M., Zajkowski M., Modelowanie rozkładu natężenia oświetlenia na powierzchni prowadnicy optycznej współpracującej z luminoforem, *Poznan University of Technology Academic Journals: Electrical Engineering*, Nr 92, 271-281, (2017)
- [7] Budzyński Ł., Influence of junction temperature on the spectra power distribution of Light Emitting Diodes, *Challenges of Modern Technology*, Vol. 6, No. 4, 3-7, (2015)
- [8] Maiti P.K., Roy B.J., Development and Performance Assessment of White LED Dimmer, *Journal of The Institution of Engineers (India): Series B*, (2017)
- [9] Swee T., Todd M.J., Halmagyi G.M., Latency and Initiation of the Human Vestibuloocular Reflex to Pulsed Galvanic Stimulation, *Journal of Neurophysiology*, Vol. 96, No. 2, 925-930, (2006)
- [10] Dorosz J., Dorosz D., Dybczyński W., Błaszczak U., Zajkowski M., Analysis of the luminous flux diffusion on the optical fiber lateral surface, *Optica Applicata*, Vol. 39, 63-76, (2009)
- [11] Dorosz J., Technologia światłowodów włókniстых, *Prace Komisji Nauk Ceramicznych / Polska Akademia Nauk, Ceramika*, Kraków, Vol. 86, (2005)
- [12] Xiao Q., Zhang H., Yan P., Wang Y., Hao J., Gong M., 100 μm core diameter monolithic fiber side-pumping coupler for 10 mJ 10 ns all-fiber laser, *Laser Physics*, Vol. 22, 1729-1733 (2012)
- [13] Gorrotkategi P., Consonni M., Gasse A., Optical efficiency characterization of LED phosphors using a double integrating sphere system, *Journal of Solid State Lighting*, Vol. 2, (2015)
- [14] Cosgun A., Fu R., Jiang W., Li J., Song J., Song X., Zeng H., Flexible quantum dot-PVA composites for white LEDs, *Journal of Materials Chemistry C*, Vol. 3, Issue 2, 257-264 (2015)
- [15] Publikacja CIE 177:2007 Colour Rendering of White LED Light Sources
- [16] Chen H., Lin H., Xu J., Wang B., Lin Z., Zhou J., Wang Y., Chromaticity-tunable phosphor-in-glass for long-lifetime high-power warm w-LEDs, *Journal of Materials Chemistry C*, Vol. 3, Issue 31, 8080-8089, (2015)
- [17] Liu L., Li H., Su P., Zhang Z., Fu G., Li B., Lü X., Red to white polymer light-emitting diode (PLED) based on $\text{Eu}^{3+}\text{-Zn}^{2+}\text{-Gd}^{3+}$ -containing metallopolymer, *Journal of Materials Chemistry C*, Vol. 5, Issue 19, 4780-4787 (2017)
- [18] Prorok M., Zajkowski M., The measurement of colorimetric parameters the luminous flux emitted from shaped optical guide cooperate with LEDs, *Proceedings of SPIE*, Vol. 10325, (2017)