

Mateusz PROROK*
Maciej ZAJKOWSKI*

MODELOWANIE STRUMIENIA ŚWIETLNEGO LUMINOFORU WYMUSZONEGO ŹRÓDŁEM HALOGENOWYM

Luminyfory fosforowe stosowane do diod elektroluminescencyjnych współpracują z emiterami półprzewodnikowymi emitującymi promieniowanie z zakresu VIS o fali długości 440-480 nm (barwa niebieska). W artykule przedstawiono pomiary charakterystyk spektralnych dla przypadku, gdy źródłem wymuszającym fotoluminescencje jest żarówka halogenowa o ciągłym widmie promieniowania zbliżonym do rozkładu Plancka. Kształtowanie bryły fotometrycznej powierzchni luminoforu która emituje promieniowanie zbliżone do rozsyłu lambertowskiego należy rozpatrywać jako zbiór punktów świetlnych. Analiza doboru wielkości luminoforu oraz kształtu reflektora współpracującego z powierzchnią emitującą światło prowadzi do określenia sprawności oprawy, kształtu i profilu wiązki wyjściowej. W artykule przedstawiono również model matematyczny konstrukcji świetlno-optycznej współpracującej z luminoforem i odbłyśnikiem parabolicznym oraz wyniki obliczeń symulacyjnych.

SŁOWA KLUCZOWE: luminofor, luminescencja, LED, sprawność konwersji

1. KONCEPCJA UKŁADU ŚWIETLNO-OPTYCZNEGO

1.1. Wstęp

Luminyfory fosforowe są stosowane w konstrukcji źródeł półprzewodnikowych emitujących promieniowanie z zakresu widzialnego o barwie białej. Promieniowanie wymuszające emisję strumienia świetlnego w wyniku zjawiska luminescencji prowadzi do doboru źródła pierwotnego o odpowiednim zakresie długości fali elektromagnetycznej tak, aby nastąpiła absorpcja fotonu oraz po krótkim czasie emisja fotonu o mniejszej energii w wyniku zjawiska fluorescencji, a później fosforescencji [1].

Oddzielenie powierzchni luminoforów od chipu LED pozwala na analizę nowej konfiguracji pracy. Na rynku dostępne są konwertery fosforowe (luminyfory) o skuteczności konwersji świetlnej wynoszącej nawet 230 lm/W [2], przy

* Politechnika Białostocka.

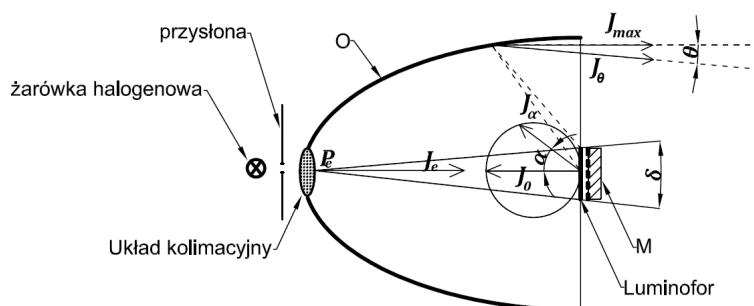
czym promieniowaniem wzbudzającym jest zazwyczaj promieniowanie z zakresu długości fali od 440 nm do 480 nm. Wzbudzony luminofor charakteryzuje się rozsyłem strumienia świetlnego zbliżonym do równomiernego.

Zastosowanie odpowiedniego układu optycznego, współpracującego z powierzchnią luminoforu emitującą strumień świetlny, pozwala na dowolne formowanie kształtu bryły fotometrycznej. Wielkość powierzchni emisyjnej źródła światła i jej umiejscowienie geometryczne względem odbłyśnika wpływa na całkowitą sprawność oprawy oraz kształtuje strumień przestrzenny.

1.2. Założenia obliczeniowe układu świetlno-optycznego

W opisywanym modelu matematycznym konstrukcji świetlno-optycznej zakłada się że :

- ze względu na fizyczne wymiary samego źródła, elementarne powierzchnie dS tworzące cały strumień świetlny Φ_L znajdują się w pobliżu ogniskowej czego efektem jest wiązka o pewnej rozbieżności kątowej. Gdyby całe źródło promieniowania widzialnego znajdowało się w nieskończenie małym punkcie uzyskana wiązka byłaby zbliżona do równoległej [3].
- reflektor współpracując z powierzchnią luminoforu, która staje się źródłem wtórnym jest wzbudzana promieniowaniem ciągłym (źródło halogenowe). Całe promieniowanie koncentrowane jest na powierzchni czynnej luminoforu przy zastosowaniu układu optycznego (rys. 1), bez zmiany rozkładu widmowego. Po zastosowaniu odpowiedniej optyki, możliwe jest skoncentrowanie całego promieniowania na dostępnej aktywnej powierzchni luminoforu.
- powierzchnia odbłyśnika ma charakter odbicia idealnie zwierciadlanego o współczynniku odbicia $\rho = 0,92$.



Rys. 1. Schemat układu optycznego współpracującego ze źródłem fotoluminescencyjnym (O – odbłyśnik $\rho = 0,92$; M – lustro $\rho_m = 0,95$)

Lustro umieszczone za luminoforem powoduje, że promieniowanie wnikające z luminescencji luminoforu widziane jest tylko po stronie wewnętrznej reflektora (rys. 1). Cały strumień Φ_L świetlny emitowany z powierzchni luminoforu

wysyłany jest w sposób równomierny w kierunku powierzchni wewnętrznej reflektora. Kształt profilu odbłyśnika, jak i położenie źródła wtórnego wpływają na sprawność oprawy oraz kształt wyjściowej bryły fotometrycznej. Układ kolimacyjny może być zbudowany dwojako: z wykorzystaniem optyki soczewkowej lub odbłyśnikowej. Zastosowanie soczewki determinuje użycie takiego jej materiału, aby tłumienie w zakresie VIS było jak najmniejsze. Zastosowanie odbłyśnika metalizowanego pozwoli na uzyskanie tej samej wartości współczynnika odbicia w całym rozpatrywanym zakresie promieniowania. Zarówno optyka soczewkowa jak i odbłyśnikowa charakteryzuje się rozbieżnością wiązki emitowanej δ (rys. 1), która determinuje rozmiar luminoforu.

2. CHARAKTERYSTYKI SPEKTRALNIE LUMINOFORU

2.1. Pomiar charakterystyki widmowej halogenowego źródła światła przepuszczonego przez luminofor fosforowy

Założono, że emitерem promieniowania będzie źródło halogenowe ($T_b = 2721$ K) emitujące promieniowanie ciągłe dla której maksimum gęstości mocy promienistej leży w zakresie podczerwieni $\lambda_{max} = 1065$ nm, zgodnie z prawem przesunięć Wiena (wzór 1).

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T_b} = \frac{2898 [nm \cdot K]}{2721 [K]} = 1065 [nm] \quad (1)$$

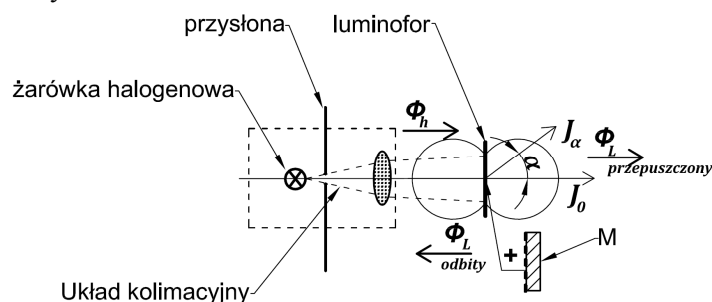
Schemat układu pomiarowego składał się ze źródła halogenowego współpracującego z kolimatorem, który naświetlając powierzchnię luminoforu wywołuje fotoluminescencję. Wykonano pomiary charakterystyki spektralnej strumienia świetlnego przepuszczonego przez luminofor oraz odbitego. W przypadku pomiaru charakterystyki spektralnej wiązki odbitej od luminoforu, wykonano pomiar z lustrem umieszczonym za powierzchnią materiału luminescencyjnego (rys. 2).

Promieniowanie z takiego zakresu widmowego padając na półprzepuszczalny luminofor powoduje emisję wtórną promieniowania widzialnego. Fragment widma źródła pierwotnego leży w zakresie barwy niebieskiej, który jest silnie absorbowany przez luminofor, a spektrum luminoforu jak i źródła nakładają się wzajemnie. W efekcie charakterystyka gęstości widmowej ulega zmianie i została przedstawiona na wykresie (rys. 3).

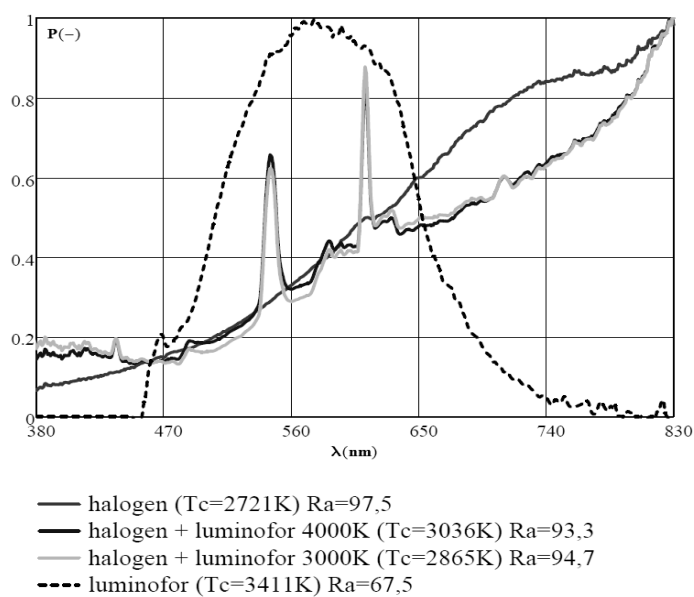
Luminofor po absorpcji promieniowania w zakresie barwy niebieskiej emituje dwie linie emisyjne (żółto-pomarańczowa i zielona) które leżą w zakresie dużej czułości oka ludzkiego.

Charakterystyka spektralna wzbudzonego luminoforu (linia przerywana) została wyznaczona na podstawie znajomości charakterystyki źródła wymuszającego fotoluminescencję oraz charakterystyki wyjściowej całego układu. Frag-

ment charakterystyki widmowej, który jest przepuszczany przez luminofor został wyeliminowany poprzez obliczenie różnicy obu zmierzonych charakterystyk spektralnych.



Rys. 2. Schemat pomiaru charakterystyki widmowej odbitej oraz przepuszczonej przez luminofor



Rys. 3. Charakterystyka spektralna źródła halogenowego przepuszczona przez materiał luminescencyjny

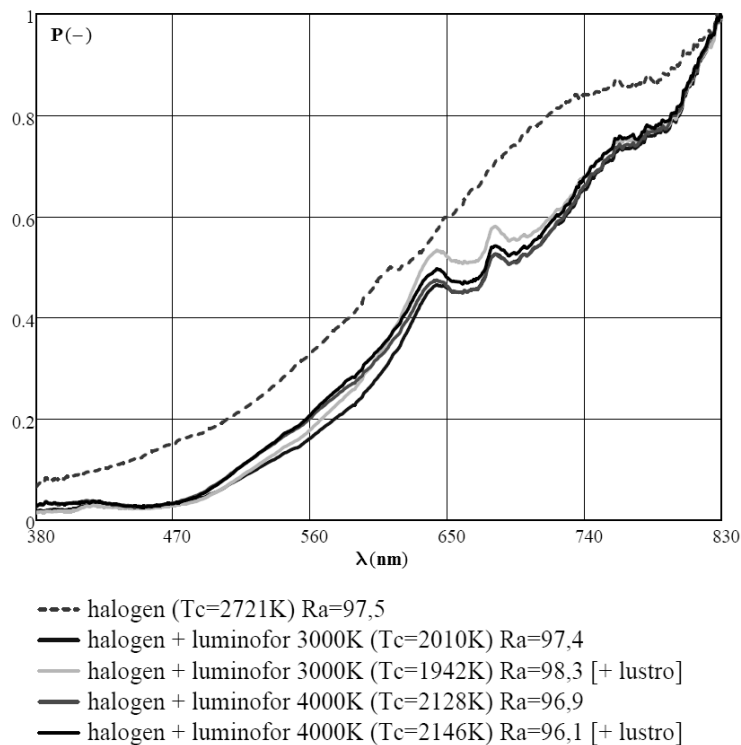
2.2. Pomiar charakterystyki widmowej światła źródła halogenowego odbitego od luminoforu

Promieniowanie wymuszające padając na powierzchnię luminescencyjną na granicy różnych ośrodków optycznych ulega zjawisku odbicia. Podobnie dzieje się przy zastosowaniu typowego rozwiązania z niebieskim emitorem półprze-

wodnikowym. Światło pochodzące z konwersji promieniowania wymuszającego jest emitowane lambertowsko z całej powierzchni luminoforu w wyniku rozpraszania M_{ie} w strukturze materiału luminescencyjnego [4]. W wyniku czego zmienia ulega kształt charakterystyki spektralnej odbitej od luminoforu przy wymuszeniu źródłem halogenowym (rys. 4).

Analiza rozkładu widmowego promieniowania, w układzie świetlno-optycznym ze źródłem halogenowym współpracującym z luminoforem fosforowym osłoniętym zwierciadłem zwrotnym prowadzi do wniosku, że promieniowanie odbite podwójnie raz od granicy luminoforu, a później od zwierciadła nie zmienia znacząco kształtu charakterystyki wyjściowej. Różnica pojawia się głównie w znacznym spadku temperatury barwowej, przy utrzymaniu wysokiego współczynnika oddawania barw ($Ra > 96$).

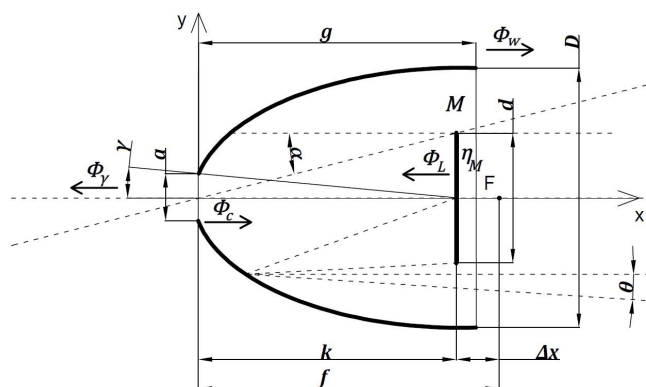
Gdy promieniowanie przechodzi przez luminofor jednokrotnie wzrasta temperatura barwowa układu względem temperatury źródła halogenowego i zmniejsza się wskaźnik oddawania barw.



Rys. 4. Charakterystyka spektralna źródła halogenowego odbita od powierzchni materiału luminescencyjnego

3. OBLICZENIA FOTOMETRYCZNE UKŁADU ŚWIETLNO-OPTYCZNEGO

Zastosowanie odbłyśnika o profilu parabolicznym pozwala na umieszczenie źródła powierzchniowego w ogniskowej zwierciadła. Średnica powierzchni luminoforu d jest znacząca w porównaniu z wielkością średnicy odbłyśnika D (rys. 5). Powierzchnia świecąca nie może być przybliżona do punktu świetlnego lecz należy traktować ją jako zbiór elementarnych punktów świetlnych. Do obliczania parametrów świetlno-optycznych uzyskanej wiązki wyjściowej układu wykorzystano obliczenia numeryczne.



Rys. 5. Graficzna reprezentacja analizowanego układu

3.1. Sprawność oprawy

Parametry zostały określone dla odbłyśnika aluminiowego dla którego współczynnik odbicia $\rho_r = 0,92$, zaś współczynnik odbicia lustra znajdującego się za luminoforem wynosi $\rho_m = 0,95$. Otwór znajdujący się w wierzchołkowej części odbłyśnika ma średnicę a . Niewielka część strumienia świetlnego emitowanego z luminoforu kierowana jest w przestrzeń, gdzie znajduje się układ wzbudzenia, założono że ta część strumienia jest absorbowana. Strumień świetlny tracony na otworze a , można powiązać z kątem γ (rys. 5) i wyrazić równaniem (2) [3]:

$$\phi_\gamma = 2\pi \int_0^\gamma I_{max} \sin(\gamma) \cos(\gamma) d\gamma = \pi I_{max} \int_0^\gamma \sin 2\gamma d\gamma \quad (2)$$

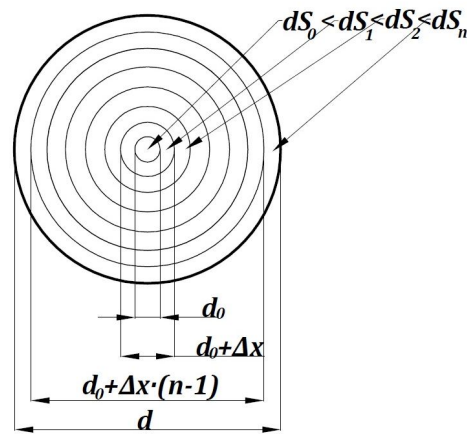
Strumień wyjściowy Φ_W dla idealnego reflektora i lustra będzie różnicą strumienia Φ_L emitowany z luminoforu pomniejszonego o strumień Φ_γ kierowany w otwór (3). Strumień emitowany z powierzchni M zależy od sprawności

konwersji luminoforu η_k oraz mocy promienistej układu wzbudzenia zawartej w pasmie absorpcji luminoforu $P_{ce(440-480\text{ nm})}$ (4).

$$\phi_W = \phi_L - \phi_\gamma \quad (3)$$

$$\phi_L = P_{ce(450-460\text{ nm})} \cdot \eta_k \quad (4)$$

W analizowanym przypadku, wtórnym źródłem światła jest powierzchnia luminoforu M , którą można podzielić na elementarne powierzchnie ΔS (rys. 6).



Rys. 6. Fragmentaryzacja powierzchni luminoforu

Podział powierzchni emitującej strumień świetlny Φ_L o charakterze lambertowskim na pierścienie, jest uzasadniony w przypadku oprawy obrotowo-symetrycznej [3]. Wartość elementarnego strumienia świetlnego Φ_n wysyłanego z powierzchni świecącej pierścienia można zastąpić punktem o ekwiwalentnej wartości światłości w przekroju osiowym odbłyśnika. Wartość światłości maksymalnej I_0 emitowanego promieniowania zależy od wielkości przyjętej powierzchni elementarnej ΔS , dla całego obszaru luminancji źródła (5), (6) i (7).

$$I_0 = \frac{\phi_L}{\pi} \quad (5)$$

$$L = \frac{I_0}{S} = const \quad (6)$$

$$I_{0n} = L \cdot \Delta S_n = \frac{I_0}{S} \cdot \pi \cdot \left[\left(\frac{d_0 + \Delta x \cdot n}{2} \right)^2 - \left(\frac{d_0 + \Delta x \cdot (n-1)}{2} \right)^2 \right] \quad (7)$$

Zastosowanie oprawy obrotowo-symetrycznej, pozwala przeprowadzić obliczenia według powyższych założeń [5]. Sprawność rzeczywistej oprawy zależy od współczynnika odbicia reflektora ρ_r i współczynnika odbicia lustra ρ_m , oraz

wartości strumienia Φ_γ traconego na otworze a układu według wzoru (8) i (9) [5]. Obliczona w ten sposób wartość sprawności oprawy η_{opr} nie uwzględnia udziału strumienia energetycznego pochodzącego od źródła wzbudzenia (pierwotnego).

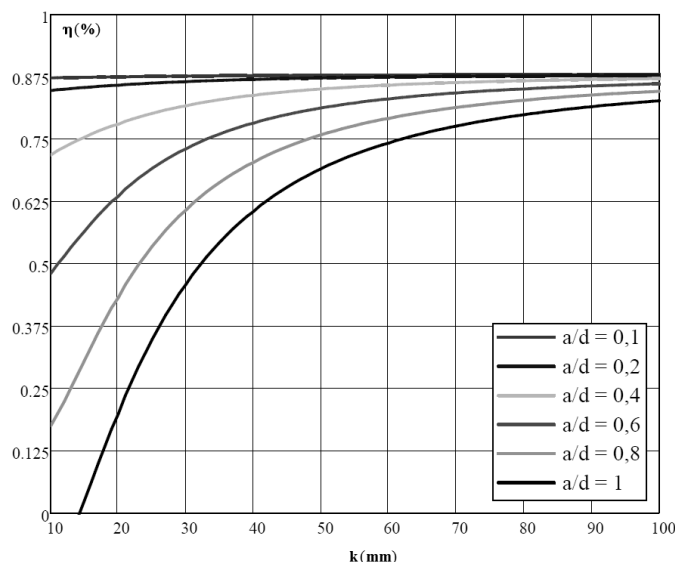
$$\eta_{opr} = \frac{\phi_w}{\phi_L} \quad (8)$$

$$\eta_{opr} = \frac{\rho_m \cdot \rho_r \cdot (\phi_L - \phi_\gamma)}{\phi_L} \quad (9)$$

Realizując opisany algorytm przyjęto przybliżenie numeryczne obliczając strumień świetlny tracony na otwór według zależności (10). Jest on prawdziwy dla niewielkich kątów γ .

$$\phi_\gamma = \sum_{n=0}^n I_{0n} \cdot \cos(\alpha_n) \cdot 2\pi \cdot [1 - \cos(\gamma_n)] \quad (10)$$

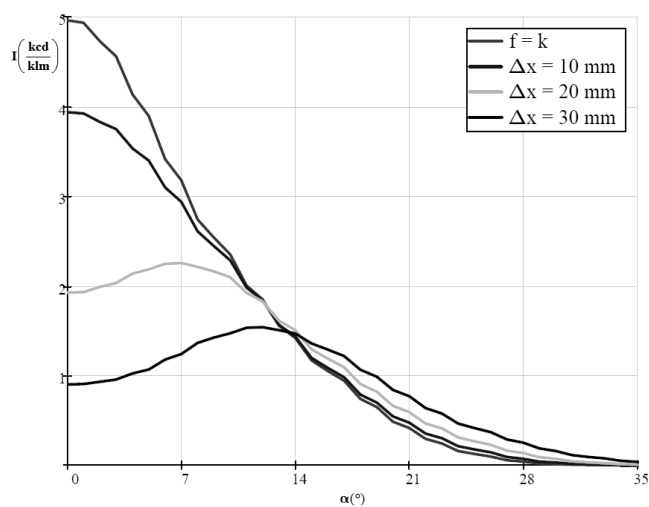
Obliczenie całkowitego strumienia traconego Φ_γ jest sumą składowych wszystkich fragmentów powierzchni świecącej Φ_n . Wraz z kolejnymi iteracjami, zmienia się układ geometryczny, punkty przesuwają się od punktu symetrii w stronę krawędzi powierzchni luminoforu. Powiązanie trygonometryczne tych parametrów w modelu matematycznym pozwoliło na obliczenie sprawności oprawy w zależności od odległości k dla kilku wybranych konfiguracji. Wyniki obliczeń numerycznych przedstawia rysunek 7.



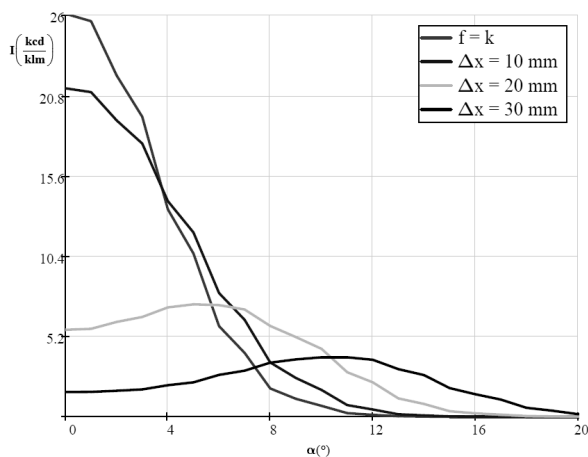
Rys. 7. Sprawność układu świetlnooptycznego w zależności od jego konfiguracji geometrycznej

3.2. Rozsył strumienia świetlnego oprawy

Wykorzystując obliczenia numeryczne przeanalizowano również kształt bryły fotometrycznej dla różnych konfiguracji geometrycznych. Rozsył strumienia świetlnego zależy głównie od stosunku D/d . Podczas zmiany parametru Δx usytuowania powierzchni świecącej M względem ogniska odbłyśnika parabolicznego zmianie ulegał kształt krzywej światłości analizowanej oprawy (rysunek 8 i 9).



Rys. 8. Krzywa światłości dla parametru $D/d = 4$



Rys. 9. Krzywa światłości dla parametru $D/d = 50$

Wraz ze zwiększaniem się wartości proporcji D/d układ przyjmował większą wartość światłości osiowej I_{max} zmniejszając rozbieżność wiązki θ , ponieważ strumień świetlny układu świetlnooptycznego jest stały [3] (rys. 8 i 9). Teoretyczna światłość uzyskana dla przypadku gdy $D/d \rightarrow \infty$ powinna dążyć do wartości $I_{max} \rightarrow \infty$ [5].

Całkowite wyjściowe strumienie świetlne Φ_W obliczone poprzez scałkowanie krzywych światłości mają zbliżone wartości dla każdego rozpatrywanego przypadku usytuowania powierzchni luminoforu względem ogniska odbłyśnika. Świadczy to o poprawności wykonanej symulacji komputerowej.

4. WNIOSKI

Analiza przedstawionego układu świetlnooptycznego daje możliwość przybliżonej oceny sprawności oraz kształtu rozsyłu światłości dla większości przypadków układów świetlnooptycznych, w których używa się niezależnie emitera promieniowania wymuszającego i luminoforu (oddzielonych fizycznie). Parametrami wejściowymi są średnice d , D , a oraz strumień całkowity emitowany przez luminofor. Na podstawie zestawienia całej rodziny konfiguracji, możliwe jest opracowanie dowolnego układu poprzez aproksymację wyników obliczeń numerycznych przedstawionych na wykresach.

Efektom zwiększania rozmiaru powierzchni emitującej strumień świetlny jest wzrost sprawności układu do wartości ilorazu współczynników odbicia, a krzywa światłości zwiększa swoją rozbieżność wiązki wyjściowej.

Promieniowanie ciągłe ze źródła halogenowego po odbiciu oraz przejściu przez luminofor ulega zmianie rozkładu spektralnego.

Układ optyczny współpracujący z wydzielonym luminoforem posiada właściwość łatwej zmiany temperatury barwowej (od 2000K do 3000K), która zależy od typu konfiguracji układu powierzchni fosforowej przy stałym promieniowaniu wzbudzającym. Możliwe jest wykonanie powierzchni emitującej strumień świetlny składającej się z kilku różnych typów luminoforów. Dzięki temu możliwe będzie uzyskanie dynamicznej zmiany rozkładu widmowego strumienia wysyłanego z oprawy. Wykorzystując bezwładność wzroku [3] oraz łatwość modulacji promieniowania pierwotnego [6], możliwe będzie sterowanie parametrami kolorymetrycznymi strumienia wyjściowego [7].

Koncepcja układu może być rozwinięta poprzez zastąpienie lustra powierzchnią OLED wykorzystującą cechę elektrycznej zależności właściwości odbijających i przepuszczających. Możliwe byłoby efektywne sterowanie krzywą światłości oprawy w zakresie rozbieżności granicznych od $\theta = 4^\circ$ do rozsyłu równomiernego, która jest bezpośrednio emitowana z powierzchni luminoforu.

LITERATURA

- [1] Jabłoński A.: Efficiency of anti-Stokes fluorescence in dyes, *Nature*, 131, 839 (1933).
- [2] Dane katalogowe luminoforu firmy Intematix: ChromaLit Remote Phosphor Light Source.
- [3] Żagan W.: Podstawy techniki świetlnej, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.
- [4] Dong-Ho Lee, Jae-Young Joo, Sun-Kyu Lee: Modeling of reflection-type laser-driven whitelighting considering phosphor particles and surface topograph.
- [5] Dybczyński W., Oleszczyński T., Skonieczna M.: Projektowanie opraw oświetleniowych, Wydawnictwa Politechniki Białostockiej, Białystok 1996.
- [6] Mustel E.R.: Metody modulacji światła, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1974.
- [7] Zajkowski M., Budzyński Ł.: Modyfikacja parametrów kolorymetrycznych w oprawach oświetleniowych ze źródłami LED, *Przegląd Elektrotechniczny* NR 7/2015 s. 67-71.

MODELLING FLUX PHOSFOR FORCED HALOGEN SOURCE

Phosphorous used in the light-emitting diode emitters cooperate with the semiconductor emitters emitting VIS radiation of wave length in range 440-480nm (blue). The article shows results of spectral characteristics for the case when the source forcing the photoluminescence is a halogen lamp with a continuous spectrum of radiation close to the Planck spectral distribution. Analysis size phosphor and the shape of the reflector cooperating with a light-emitting surface leads to a determination in efficiency, the shape and profile of the output beam. The paper also presents the mathematical model of light-and-optical cooperating with phosphor and parabolic reflector and the results of calculations lighting system.

(Received: 31. 01. 2016, revised: 7. 03. 2016)