

Mateusz PROROK\*  
Maciej ZAJKOWSKI\*

## MODELOWANIE ROZKŁADU NATEŻENIA OŚWIETLENIA NA POWIERZCHNI PROWADNICZY OPTYCZNEJ WSPÓLPRACUJĄCEJ Z LUMINOFOREM

Luminofony fosforowe stosowane do źródeł półprzewodnikowych współpracują z quasi-monochromatycznym źródłem promieniowania z zakresu barwy niebieskiej i emitują światło białe. Długość fali promieniowania wmuszającego zawiera się w wąskim przedziale absorpcyjnym materiału luminescencyjnego dla którego uzyskiwane są określone parametry barwne. Zmiana charakteru spektralnego promieniowania pierwotnego wpływa na sprawność konwersji oraz parametry kolorymetryczne strumienia wyjściowego uzyskiwanego w wyniku fotoluminescencji. Realizacja układu złożonego z kilku niezależnych emiterów półprzewodnikowych sprzężonych z torem optycznym pozwoli na oświetlenie wybranego fragmentu powierzchni luminoforu oraz sterowanie zakresem widmowym promieniowania wymuszającego. Geometria prowadnicy optycznej powinna zapewnić wysoką sprawność układu, jak również równomierność oświetlenia powierzchni luminoforu. Artykuł przedstawia analizę procesu formowania wiązki świetlnej w torze optycznym, w zależności od jej wymiarów geometrycznych oraz usytuowania źródła promieniowania.

SŁOWA KLUCZOWE: luminofor, luminescencja, LED, prowadnica optyczna

### 1. WSTĘP

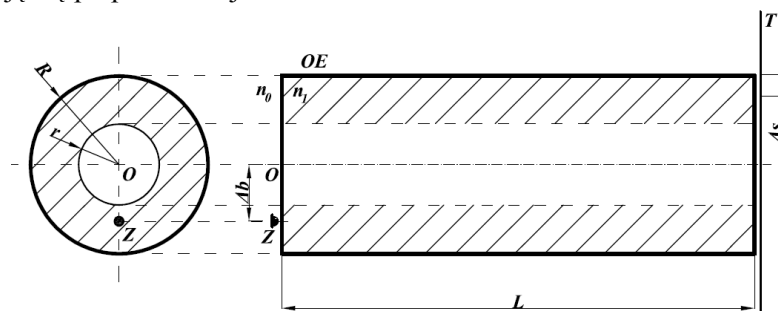
Układ świetlno-optyczny prowadnicy optycznej realizujący równomierne oświetlenie powierzchni wyjściowej wykonano z materiału optycznego o większym współczynniku załamania ( $n_1 > n_0$ ) niż otoczenie. Aby uniemożliwić stratę promieniowania poza obszarem toru optycznego wykorzystuje się zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia w obszarze prowadnicy optycznej, uzyskując w ten sposób wysoką sprawność układu [1].

W wyniku sprzężenia źródła światła z czołem wejściowym prowadnicy (rys. 1), nieznaczna część strumienia świetlnego ulega odbiciu Fresnela [2], a dodatkowe straty występują w materiale optycznym z którego wykonano prowadnicę. Wówczas prawie cały strumień świetlny źródła ulega przeniesieniu w obszar powierzchni oświetlanej ograniczonej aperturą wyjściową światłowodu.

---

\* Politechnika Białostocka.

W analizowanym układzie obrotowo-symetrycznym położenie punktu  $Z$  (położenie źródła światła) względem osi symetrii  $O$  zdeterminowane jest zapewnieniem wysokiej równomierności oświetlanej powierzchni luminoforu  $T$ , który znajduje się po przeciwnej stronie.



Rys. 1. Schemat geometryczny układu światłno-optycznego:  $Z$  – źródło światła,  $OE$  – element optyczny,  $T$  – powierzchnia luminoforu,  $R$  – promień przewodnicy,  $r$  – promień otworu wewnętrznego przewodnicy,  $L$  – długość toru optycznego,  $\Delta s$  – rozmiar przyjętej siatki pomiarowej,  $O$  – środek osi symetrii układu obrotowo-symetrycznego

Istnieje możliwość umieszczenia układu złożonego z kilku niezależnych źródeł na powierzchni wejściowej przewodnicy. Analiza sprowadzi się wówczas do uzyskania stałego rozkładu natężenia oświetlenia oraz utrzymania stałych parametrów kolorymetrycznych.

Widmo promieniowania złożone z wielu monochromatycznych emiterów ulega wymieszaniu w torze optycznym. Każda długość fali przenoszona przez układ optyczny ulega innej absorpcji oraz charakteryzują się odmiennymi stratami sprzężenia [3] zależnego bezpośrednio od współczynnika załamania  $n_1$ .

Uzyskany rozkładu natężenia oświetlenia strumienia wyjściowego w układzie wieloemiterowym należy rozpatrywać w ujęciu energetycznym jak i w dziedzinie kolorymetrii. Analiza sprowadza się wówczas do wyznaczenia parametrów kolorymetrycznych takich jak najbliższa temperatura barwowa CCT, poprzez dane położenia punktów chromatyczności  $x, y$  CIE1931 [4].

## 2. METODYKA POMIARÓW

### 2.1. Założenia oraz parametry ośrodka optycznego

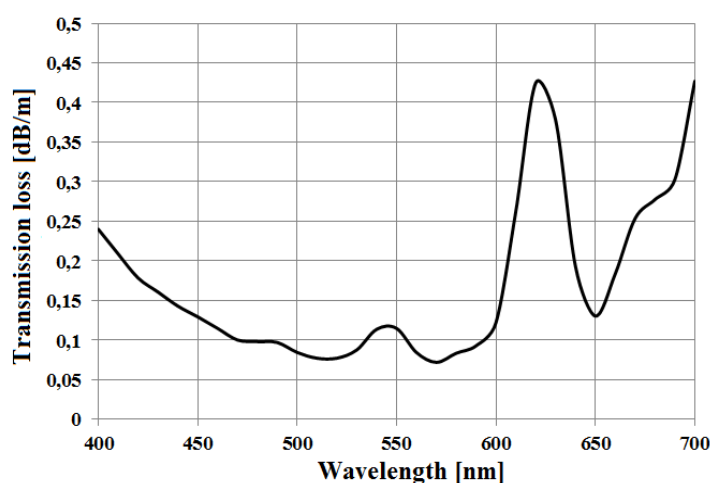
W obliczeniach symulacyjnych przyjęto, że przewodnica optyczna wykonana ze jest szkła akrylowego (PMMA) o współczynniku załamania  $n_1 = 1,506$  oraz tłumieniu na poziomie  $0,24$  dB/m dla długości fali  $400$ nm (rys. 2), dyspersja ośrodka w przedziale VIS wynosi  $\Delta n = 0,021$  [5]. Założono, że materiał jest

ośrodkiem izotropowym optycznie [6]. Współczynnik tłumienia  $\alpha$  [1/mm] wymaga przeliczenia zgodnie ze wzorami:

$$A = \log(e^{-\alpha L}) \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{\ln(10^{0,001 \cdot A})}{L} \quad (2)$$

gdzie:  $L$  – długość drogi optycznej [m],  $A$  – wartość tłumienia [dB/m],  $\alpha$  – absorpcja właściwa [1/mm].

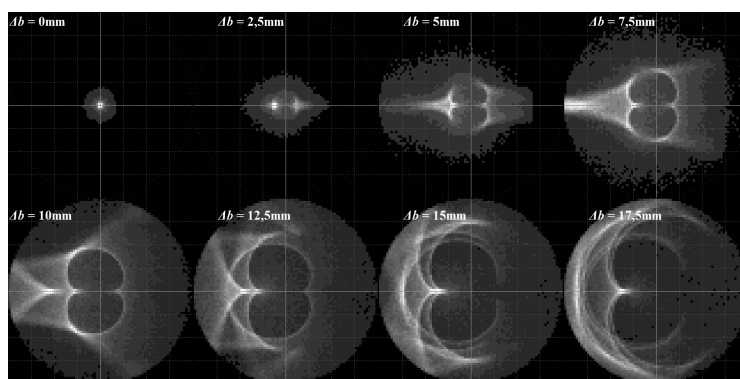


Rys. 2. Straty w materiale optycznym PMMA w zależności od długości fali [7, 8]

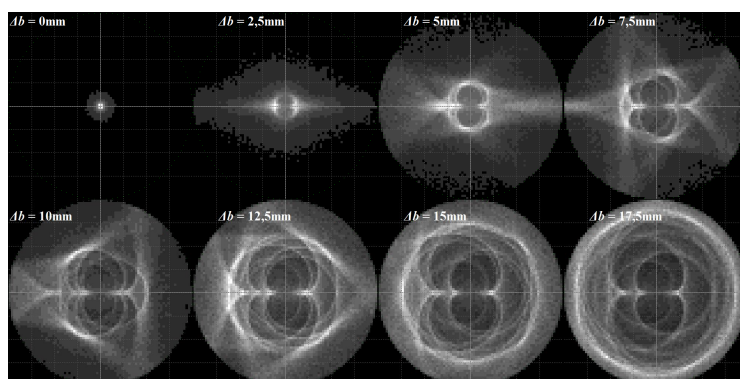
Zarówno współczynnik załamania jak i absorpcja materiału zależy od rozpatrywanej długości fali [5]. Jeżeli źródło ma szeroki rozkład spektralny pojawi się deformacja widma przepuszczonego przez przewodnicę optyczną. Rozkład parametrów kolorymetrycznych w tym przypadku na powierzchni wyjściowej nie będzie stały, jak ma to miejsce dla źródła quasi-monochromatycznego. Należy wówczas dodatkowo rozpatrywać rozkład temperatury barwowej oraz położenie punktów chromatyczności.

## 2.2. Wyniki obliczeń numerycznych

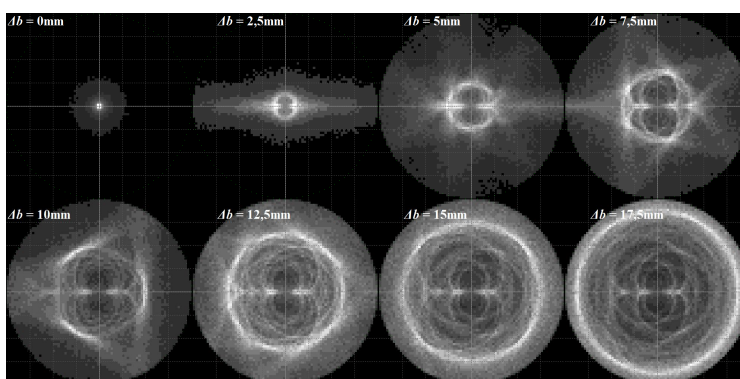
Przyjęto następujące parametry układu optycznego  $R = 20$  mm  $r = 0$  mm  $\Delta b = 0 \dots 17,5$  mm,  $L = 100 \dots 500$  mm dla rozdzielczości siatki  $\Delta s = 0,5 \times 0,5$  mm. Wykonane obliczenia symulacyjne przedstawiono w postaci rozkładów natężenia oświetlenia w obszarze pomiarowym (na powierzchni luminescencyjnej) (rys. 3 – rys. 5).



Rys. 3. Rozkład natężenia oświetlenia na powierzchni pomiarowej  $T$  dla długości toru  $L = 100$  mm



Rys. 4. Rozkład natężenia oświetlenia na powierzchni pomiarowej  $T$  dla długości toru  $L = 200$  mm



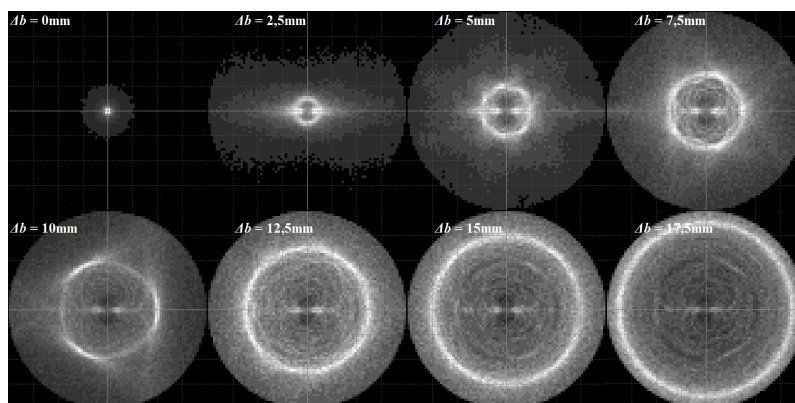
Rys. 5. Rozkład natężenia oświetlenia na powierzchni pomiarowej  $T$  dla długości toru  $L = 300$  mm

Położenia źródła wpływa na rozkład natężenia oświetlenia na badanej powierzchni  $T$ , nie wpływając na ilość całkowitego strumienia świetlnego padającego na obszar pomiarowy. Przewodnica przenosi obraz źródła tylko z obszaru centralnego (osiowego). Niesymetria położenia źródła  $Z$  względem osi przewodnicy powoduje powstanie kaustyki w obrazie pomiarowym. Zwiększenie długości toru  $L$  skutkuje nakładaniem się wielu krzywych kaustycznych następujących po sobie.

Każda kolejna krzywa kaustyczna obrócona jest o kąt  $180^\circ$  względem poprzedniej. Wówczas równomierność powierzchni oświetlanej zwiększa się wraz ze wzrostem  $L$  drogi propagacji promieniowania w przewodnicy.

Przeprowadzone analizy dowodzą, że obrazy uzyskane na powierzchni luminoforu są wynikiem poszczególnych etapów propagacji wiązki świetlnej w torze optycznym. Przedstawiają proces jej formowania w zależności od parametrów geometrycznych dla założonego materiału optycznego.

Dla toru walcowego na odcinakach powyżej 500 mm (rys. 6) przedział największej wartości oświetlenia „rysuje” krawędź okręgu, którego promień zależy od położenia źródła względem osi symetrii. Sterowanie poszczególnymi obszarami powierzchni luminoforu można zrealizować w oparciu o taki układ elektromechaniczny który bezpośrednio wpływa na parametr  $\Delta b$ . Jednak pozostały obszar oświetlany będzie efektem niepożądanym. Modyfikacją układu może być zastosowanie odpowiedniego profilu rurowego.



Rys. 6. Rozkład natężenia oświetlenia na powierzchni pomiarowej  $T$  dla długości toru  $L = 500$  mm

### 2.3. Wyznaczenie sprawności układu świetlno-optycznego

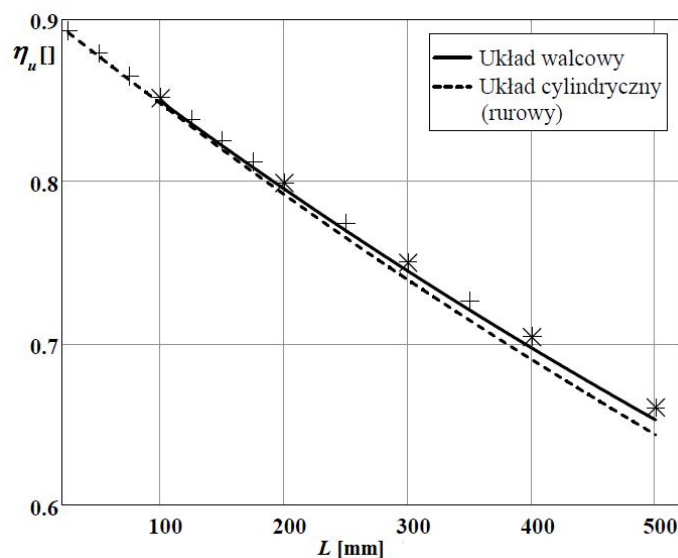
Sprawność układu uwzględniająca aspekty takie jak sprawność sprzężenia oraz straty w torze optycznym wyznaczono zależnością (3). Strumień świetlny uznawany za użyteczny jest scałkowaną wartością po rozkładzie natężenia

oświetlania na powierzchni luminoforu względem przyjętej elementarnej powierzchni  $\Delta s$ .

$$\eta_u = \frac{\phi_T}{\phi_Z} \quad (3)$$

gdzie:  $\eta_u$  – sprawność układu świetlno-optycznego,  $\phi_T$  – strumień świetlny padający na powierzchnie pomiarową  $T$ ,  $\phi_Z$  – strumień świetlny źródła.

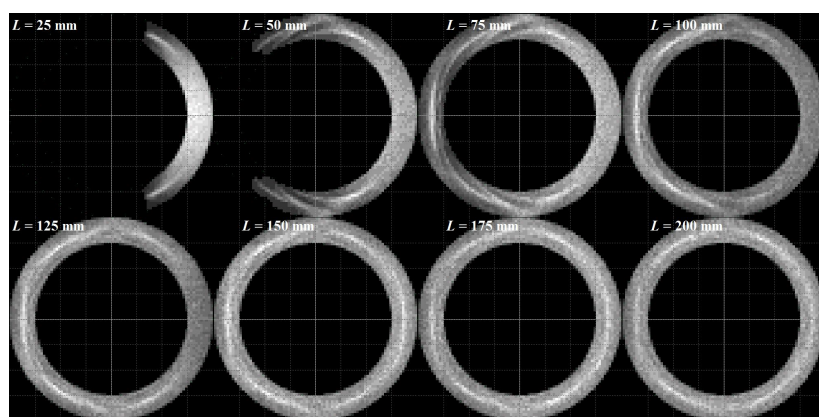
Wyznaczenie sprawności układu określono na zasadzie aproksymacji punktów pomiarowych (obliczonych numerycznie) w postaci krzywej zależnej od długości prowadnicy  $L$ . Układ walcowy oraz cylindryczny (rurowy) pokrywają się na liniowej charakterystyce w analizowanym przedziale długości. Sprawność układu spada w obu przypadkach (od 90%), gdyż jest wynikiem zwiększenia drogi propagacji światła w torze optycznym. Umieszczenie źródła  $Z$  o nieznacznych wymiarach w pobliżu powierzchni czoła wejściowego powoduje zachowanie stałej wartości strumienia świetlnego traconego na odbicie Fresnela (około 10%). Wówczas nachylenie krzywej wykresu zdeterminowane jest wartością średnich strat absorpcyjnych w materiale prowadnicy dla danego widma (rys. 7).



Rys. 7. Sprawność układu optycznego w zależności od długości  $L$  prowadnicy optycznej dla układu walcowego oraz cylindrycznego

Analiza dotycząca zapewnienia równomierności oświetlanej powierzchni dla układu prowadnicy rurowej przedstawia (rys. 8). Skuteczność wymieszania promieniowania monochromatycznego określono na podstawie znalezienia takiej długości toru optycznego  $L$  przy którym źródło umieszczone asymetrycz-

nie zapewni rozkład symetryczny na powierzchni czoła wyjściowego. Umieszczenie kolejnego źródła w obszarze pierścieniowego czoła przewodnicy spowoduje wymieszanie strumienia świetlnego emitowanego z niezależnych punktów. Układ przenosi moc optyczną (strumień świetlny) w postaci pola ograniczonego średnicą zewnętrzną oraz wewnętrzną przewodnicy. Takie rozwiązanie pomimo lepszej sprawności nie oświetla całej dostępnej powierzchni pomiarowej. Wówczas jej równomierność jest zapewniona tylko w wąskim polu użytecznym, co jest niepodważalną zaletą tego układu.



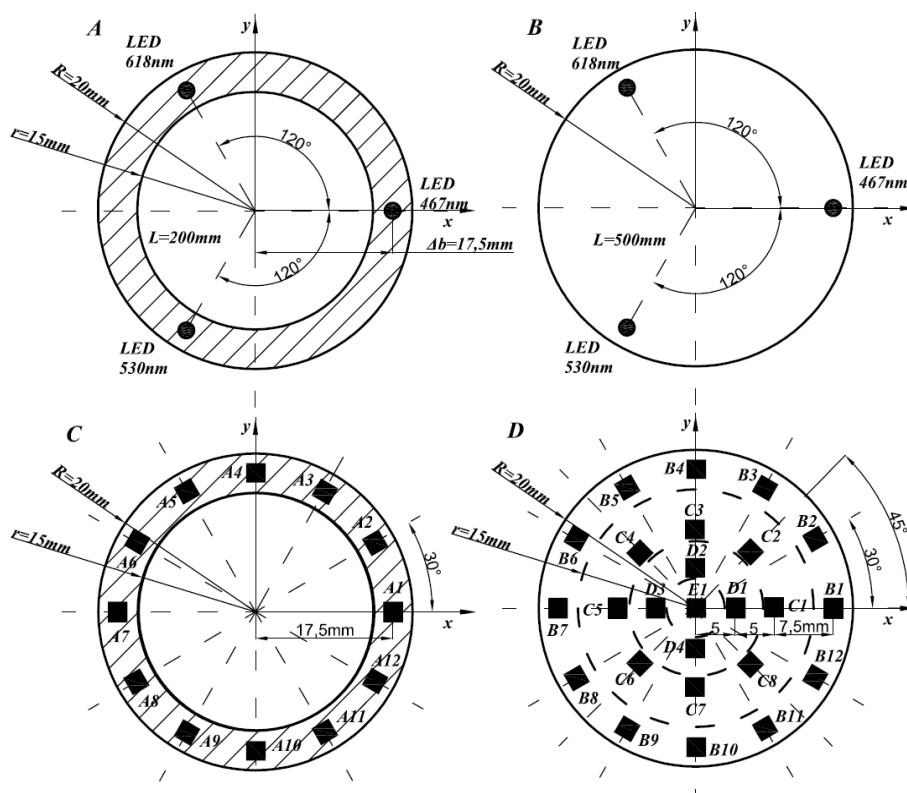
Rys. 8. Rozkład natężenia oświetlenia na powierzchni wyjściowej  $T$  dla źródła w położeniu  $\Delta b = 17,5\text{mm}$  w układzie cylindrycznym (rurowym) dla  $R = 20\text{ mm}$ ,  $r = 15\text{ mm}$

### 3. ANALIZA UKŁADU WIELOEMITEROWEGO

W przypadku zastosowania kilku źródeł quasi-monochromatycznych różniących się długością fali dominującej które, leżących w zakresie VIS możliwe jest uzyskanie złożonego widma wyjściowego. Tor optyczny pełniący funkcję mieszacza powinien zapewnić stałe parametry barwne na całej oświetlanej powierzchni. Sterowanie parametrami kolorymetrycznymi zrealizowano elektronicznie poprzez regulację wartości strumienia świetlnego emitowanego z poszczególnych źródeł. W obliczeniach przyjęto jeden przypadek skorelowanych emiterów, zadając stałą moc optyczną każdemu ze źródeł półprzewodnikowych.

Wykorzystując poprzednie analizy porównano układ walcowy ( $L = 500\text{ mm}$ ) oraz układ rurowy ( $L = 200\text{ mm}$ ) pod kątem przestrzennej stałości spektralnej wyjściowego strumienia świetlnego. Umieszczono trzy źródła monochromatyczne RGB w stałej odległości kątowej względem siebie oraz oddalonych od osi symetrii przewodnicy optycznej o  $\Delta b = 17,5\text{ mm}$  (rys. 9 A, B). Obszary detekcyjne  $\Delta S$  po stronie wyjściowej toru rozmieszczono w sposób zależny od typu przewodnicy (rys. 9 C, D). Oznaczenie obszarów pomiarowych jak i położenie

źródła jest względem przyjętych osi  $x$ ,  $y$ . Profil walcowy podzielono na strefy  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ,  $E$  przy czym strefa  $B$  pokrywa się z obszarem detekcyjnym  $A$  przewodnicy o profilu rurowym.



Rys. 9. Układ geometryczny rozmieszczenia źródeł na powierzchni czola przewodnicy optycznej (A, B) oraz elementów detekcyjnych w obszarze wyjściowym – pomiarowym  $T$  (C, D)

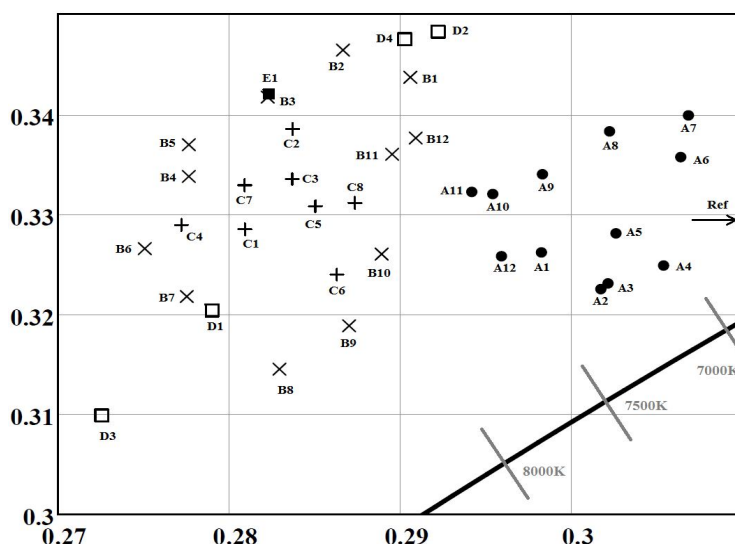
Pomiary parametrów barwy otrzymanej w wyznaczonych punktach pomiarowych nie są stałe, ale mieszczą się w pewnym zakresie (rys. 10). Każda z przyjętych stref pomiarowych charakteryzują się pewnym rozrzutem położenia punktów chromatyczności. Punkt referencyjny  $Ref$  ( $x = 0,312$ ;  $y = 0,328$ ) leży poza wykresem (obok iluminatu D65). Wówczas zbiór wyników dla profilu rurowego leży znacznie bliżej punktu odniesienia. Strefa  $A$  charakteryzuje się mniejszym obszarem rozrzutu ograniczonego przez wszystkie punkty pomiarowe niż analogiczna strefa  $B$  profilu walcowego. Wprowadzenie toru optycznego o innym kształcie zwiększyło również najbliższą temperaturę barwową z referencyjnej 6525 K  $\rightarrow$  (6726 K – 7523 K) dla strefy  $A$  oraz w przypadku drugiego profilu 6525 K  $\rightarrow$  (7551 K – 8902 K) dla strefy  $B$  (tab. 1).



Tabela 1. Wyniki pomiarów z obszarów detekcyjnych dla poszczególnych stref

Strefa	$x_{min} - x_{max}$	$y_{min} - y_{max}$	$CCT_{sr}$	$CCT_{min} - CCT_{max}$	$\Delta m_{min} - \Delta m_{max}$
<b>A</b>	0,294–0,307	0,323–0,340	7172K	201–998K	0,008–0,019
<b>B</b>	0,275–0,291	0,315–0,246	8195K	1026–2377K	0,023–0,037
<b>C</b>	0,277–0,287	0,324–0,339	8235K	1434–2161K	0,025–0,035
<b>D</b>	0,273–0,292	0,310–0,348	8356K	7396–9714K	0,028–0,044
<b>E</b>	$x = 0,282$	$y = 0,342$	8049K	–	$\Delta m = 0,033$

[ $\Delta m$  – odległość względem współrzędnej referencyjnej w układzie  $x, y$  CIE1931,  $CCT_{sr}$  – średnia najbliższa temperatura barwowa wszystkich punktów w danej strefie]



Rys. 10. Rozmieszczenie punktów pomiarowych w układzie współrzędnych chromatycznych CIE1931: „•” – Położenie punktów dla strefy A (profil rurowy), „x” – Położenie punktów dla strefy B (profil walcowy), „+” – Położenie punktów dla strefy C (profil walcowy), „□” – Położenie punktów dla strefy D (profil walcowy), „■” – Położenie punktów dla strefy E (profil walcowy)

W strefach centralnych C, D, E wymieszanie zachodzi najgorzej – pojawiają się lokalne gradienty barwne. Te obszary układu walcowego są mniej istotne z punktu analizy kolorymetrycznej z powodu przenoszenia niewielkiej mocy optycznej.

Równomierność oświetlanej powierzchni dla układu złożonego z kilku źródeł jest znacznie lepsza niż w układzie pojedynczym. Uzyskiwany w ten sposób obraz nie odzwierciedla parametrów barwnych lecz przedstawia rozkład mocy optycznej na powierzchni pomiarowej. Strumień świetlny jest więc sumą rozkładów oświetlenia każdego emitera przesuniętego względem siebie o stały kąt, w omawianym przypadku ta wartość wynosi  $120^\circ$  (rys. 9 A, B).

#### 4. WNIOSKI

Prowadnica optyczna oświetlająca powierzchnie luminoforu pełni również funkcję mieszacza widmowego. Zapewnienie równomiernego natężenie oświetlanej powierzchni pomiarowej wywołane strumieniem świetlnym z pojedynczego emitera determinuje stopień zmieszania układów wieloemiterych, rozmieszczonych równomiernie na powierzchni czoła prowadnicy (zachowując stałą odległość od osi symetrii toru). Realizacja takiej funkcji skutkuje wydłużeniem toru optycznego, co przekłada się bezpośrednio na sprawność całego układu oraz wprowadza większe odkształcenia widma w wyniku nieliniowej tłumienności materiału prowadnicy.

Tor optyczny o profilu cylindrycznym (rurowym) zapewnia względnie dobre wymieszanie już na odcinku 0,2 m jednak oświetlana powierzchnia ma kształt pierścienia. W przypadku prowadnicy walcowej zadowalający efekt występuje na długości co najmniej 0,5 m. Moc optyczna przenoszona przez tor optyczny maleje liniowo w zależności od długości toru niezależnie od typu prowadnicy.

Obliczenia symulacyjne dają tylko pogładową ocenę zjawiska i należy potwierdzić otrzymane wyniki badaniami w układzie rzeczywistym. Na wartość wyników ma wpływ ilość zadanych elementarnych promieni świetlnych oraz wymiary przyjętej siatki pomiarowej. Analiza numeryczna ograniczona jest założeniami które pomijają niektóre nieliniowe i falowe zjawiska fizyczne występujące w układzie.

*Badania zostały zrealizowane w ramach pracy MB/WE/5/2015 oraz S/WE/1/2015 i sfinansowane ze środków na naukę MNiSW.*

#### LITERATURA

- [1] Zajkowski M., Światłowody z boczną emisją strumienia świetlnego, Przegląd Elektrotechniczny, 2003, nr.4, 236–238.
- [2] Dorosz J., Dorosz D., Dybczyński W., Błaszczak U., Zajkowski M., Analysis of the luminous flux diffusion on the optical fiber lateral surface, Optica Applicata, 2009, vol. 39, 63–76.

- [3] Xiao, Q., Zhang, H., Yan, P., Wang, Y., Hao, J., Gong, M., 100  $\mu\text{m}$  core diameter monolithic fiber side-pumping coupler for 10 mJ 10 ns all-fiber laser, *Laser Physics*, 2012, Vol.22, 1729–1733.
- [4] Badgutdinov M. L., Korobov E. V., Luk'yanov F. A., Yunovich A. É., Kogan L. M., Gal'china A., Rassokhin I. T., Soshchin N. P., Luminescence Spectra, Efficiency, and Color Characteristics of White-Light-Emitting Diodes Based on p-n InGaN/GaN Heterostructures with Phosphor Coatings, *Semiconductors*, 2006, Vol. 60, 739–744.
- [5] Ivan Bodurov I., Yovcheva T., Sainov S., PMMA films refractive index modulation via TiO<sub>2</sub> nanoparticle inclusions and corona poling, *Colloid and Polymer Science*, 2014, Vol. 292: 3045.
- [6] Al-Saymari, F.A., Badran, H.A., Al-Ahmad, A.Y., Emshary C. A., Time dependent diffraction ring patterns in bromothymol blue dye doped PMMA film under irradiation with continuous wave green laser light, *Indian Journal of Physics*, 2013, Vol. 87: 1153.
- [7] Schubert E.F., *Light-Emitting Diodes*, Cambridge University Press, 2006.
- [8] Kyoung, W. J., Sang, H. S., Seon, G. K., Jae, S. K., Wook, J. Y., Young, H. J., Bongsoo, L., Measurement of Cerenkov radiation induced by the gamma-rays of Co-60 therapy units using wavelength shifting fiber, *Sensors*, 2014, Vol.14, 7013–7025.

#### **MODELLING OF ILLUMINANCE DISTRIBUTION ON THE OPTICAL WAY COOPERATING WITH PHOSPHOR**

Used for white semiconductor light sources phosphoric phosphors cooperate with quasi-monochromatic blue light source. Forcing radiation wavelength closes in narrow adsorption range of phosphor material for with exact colour parameters are achieved. Primary radiation spectral nature alteration affects conversion efficiency and colorimetric parameters of optical flux obtained by photoluminescence. Realization of the system containing few independent semiconductor emitters coupled with optical path will allow to illuminate selected phosphor surface and control forcing radiation spectral range. Optical way geometry should ensure system high efficiency, as well as illuminated phosphorus surface uniformity. Article presents the analysis of light beam formation process in optical path, depending on its geometrical dimensions and light source location.

*(Received: 16. 01. 2017, revised: 28. 02. 2017)*