

## Ocena możliwości modelowania temperatury barwowej najbliższej zestawu diod LED dużej mocy

**Streszczenie.** Nowoczesne systemy oświetleniowe wysokiej sprawności oraz specjalistyczne dedykowane do zastosowań medycznych oświetlacze mogą zapewniać pracę przy różnych wartościach temperatury barwowej w zależności od aktualnych potrzeb. Opracowany został zestaw diod LED dużej mocy tworzący wieloemiteryjne źródło światła białego. Kryterium selekcji diod LED do zestawu była możliwość regulacji temperatury barwowej najbliższej źródła przy zapewnieniu dobrego oddawania barw. Oceniona została realna możliwość sterowania temperaturą barwową źródła światła białego zbudowanego na bazie takiego zestawu przy zachowaniu wysokiej wartości wskaźnika oddawania barw.

**Abstract.** Modern high-efficiency lighting systems and specialized illuminators dedicated to medical applications can operate with different colour temperature values depending on current requirements. The set of high-power LEDs creating the multi-emitter white light source has been developed. The selection criterion for the set of LEDs was the ability to adjust the nearest colour temperature of source with ensuring good colour rendering. Feasible ability to adjust the colour temperature of white light source built on the basis of such set with maintaining a high colour rendering index value was estimated. (Evaluation of possibility of correlated color temperature modelling for high power LEDs set).

**Słowa kluczowe:** dioda LED, wskaźnik oddawania barw, temperatura barwowa.

**Keywords:** LED, color rendering index, color temperature.

### Wstęp

Wrażenie barwy jest reakcją oka ludzkiego na długość fali rejestrowanego promieniowania widzialnego. Promieniowanie widzialne zawiera się w zakresie długości fal (380 - 780) nm, co oko rozpoznaje jako barwy: od fioletu (380 - 450) nm, poprzez niebieską (450 - 495) nm, zieloną (495 - 570) nm, żółtą (570 - 590) nm, pomarańczową (590 - 620) nm aż do czerwieni (620 - 780) nm [1]. Charakterystyczną cechą światła białego - idealnie oddającego wrażenie barwne - wytwarzanego na drodze inkadescencji jest ciągłość jego widma tzn., że jest ono zrównoważoną mieszaniną wszystkich częstotliwości promieniowania z całego zakresu spektralnego promieniowania widzialnego [2].

Od kilku lat powszechne staje się zastępowanie tradycyjnych źródeł światła białego źródłami opartymi o zastosowanie diod LED charakteryzujących się najwyższą skutecznością świetlną spośród obecnie dostępnych źródeł światła białego - osiągają nawet 200 lm/W [2-4]. Ich zastosowanie w oświetleniu ogólnym lub dedykowanym do specjalnych celów (np. medycznych) stwarza jednak wiele problemów [5]. Głównym z nich jest jakość światła białego w kontekście iluminacyjnym umożliwiającą właściwe rozróżnianie barwy oświetlanych obiektów. Rozwijane są nowe metody definiowania jakości oddawania barw ze względu iż obecnie obowiązujące niezbyt pasują do oceny źródeł elektroluminescencyjnych [6]. Ogólnie przyjętą i stosowaną metodą charakteryzacji tego parametru światła wciąż jest wskaźnik oddawania barw  $R_a$  (z ang. Color Rendering Index - CRI) [3].

Ponadto złącza półprzewodnikowe diod LED emitują [7] promieniowanie w wąskim zakresie widma (o szerokości połówkowej rzędu kilkunastu nanometrów), czyli światło jednobarwne (quasi-monochromatyczne), przez co nie jest możliwe uzyskanie światła białego z pojedynczego złącza półprzewodnikowego.

Możliwe jest natomiast uzyskanie barwy białej światła diod LED poprzez dobór odpowiednich proporcji natężeń poszczególnych barw składowych. Zazwyczaj w celu wytworzenia światła białego wykorzystując promieniowanie diod LED miesza się podstawowe barwy światła, z których każda generowana jest w określony sposób. Stosuje się przy tym dwie główne metody otrzymywania barw składowych diod LED emitujących światło białe: poprzez konwersję światła jednego typu diody [8-11] lub przez

mieszanie podstawowych barw światła z trzech oddzielnych chipów RGB [7, 12-15].

W źródłach światła białego bazujących na konwersji długości fali promieniowanie emitowane przez diodę LED jest częściowo lub w całości wykorzystywane do optycznego wzbudzenia luminoforu (fluorescencja), mieszaniny luminoforów, struktur półprzewodnikowych lub barwników organicznych [16-18].

W pierwszym przypadku całość (z diodami LED UV) lub część (z diodami LED niebieskimi) uzyskiwanego widma widzialnego pochodzi z emisji z luminoforu, co uniezależnia to widmo od konkretnej intensywności i długości fali diody pobudzającej oraz daje relatywnie wysokie wartości współczynnika oddawania barw [4]. Odcień światła białego może się różnić w zależności od grubości warstwy luminoforu, co umożliwia regulację temperatury barwowej. W przypadku źródeł, których punkty chromatyczności leżą poza krzywą emisji ciała doskonale czarnego używa się terminu temperatura barwowa najbliższa ( $T_{CP}$  lub CCT, wyrażona w kelwinach). Jest to taka temperatura ciała czarnego, dla której barwa postrzegana jest najbardziej zbliżona do barwy analizowanego światła. W ten sposób wytworzone może być światło o różnych odcieniach, takich jak białe ciepłe, neutralne lub chłodne. Rozwiązanie to cechuje prosta technologia produkcji, niskie koszty i nieskomplikowany układ zasilania diod LED w oprawie oświetleniowej. Jednak ze względu na konwersję całości światła emitowanego przez złącze p-n w luminoforach dochodzi do sporych strat energetycznych, przez co metoda ta nie jest szczególnie efektywna. Obecnie produkcja diod LED białych na drodze wzbudzenia luminoforu promieniowaniem UV jest rzadka przez wzgląd na słabą odporność materiałów obudowy na to promieniowanie oraz jego szkodliwe działanie na zdrowie (szczątkowe promieniowanie UV przedostaje się przez warstwy luminoforu), a także ich niską wydajność, głównie ze względu na bardzo duże przesunięcie Stokes'a - sprawność konwersji zmieniającej długość fali światła z wartości  $\lambda_1$  na  $\lambda_2$  wynosi  $\lambda_1/\lambda_2$ . Rozwiązanie połączenia diody LED emitującej światło niebieskie i żółty luminofor to obecnie dominująca konstrukcja diody LED emitującej światło białe.

Innym typem konwerterów są półprzewodniki, w których następuje emisja światła wywołana wcześniejszą absorpcją energii z pierwotnego źródła diodowego, np. photon-recycling semiconductor LED [17]. Układy PRS-LED mają

dobrą wydajność, ale ze względu na małą szerokość widm emisyjnych półprzewodników stosunkowo niski współczynnik oddawania barw. Białe diody LED można również produkować używając jako konwerterów barwników organicznych [16, 18]. Największym problemem przy takich rozwiązaniach jest niska żywotność barwników, które pod wpływem absorpcji kolejnych fotonów stopniowo przestają być aktywne optycznie, blakną. Wykazują też małą różnicę pomiędzy długościami fal: absorbowanej i emitowanej, która może wykluczyć powstawanie światła białego.

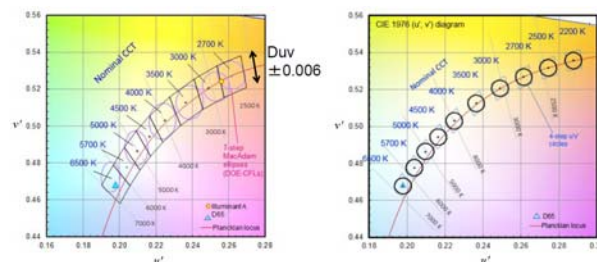
Źródła opierające zasadę działania o konwersję długości fali nie są odpowiednie do specjalnych zastosowań oświetleniowych wymagających realizacji strojenia temperatury barwowej, a więc bieżącej zmiany proporcji składowych widmowych promieniowania.

Druga metoda wytwarzania światła białego ze złącza półprzewodnikowego polega na umiejscowieniu w jednej obudowie chipów emitujących trzy podstawowe barwy światła: czerwoną, zieloną i niebieską (RGB, ang. Red Green Blue) [12, 15]. Zwykle niebieskie i zielone światło uzyskuje się z diody InGaN, a czerwone z diody AlGaInP. W wyniku nałożenia się w odpowiednich proporcjach wiązek emitowanych z tych materiałów powstaje światło białe. Ponieważ nie ma w tym rozwiązaniu elementu pośredniego w postaci procesu konwersji promieniowania (np. za pomocą luminoforu), nie występują związane z tym straty energetyczne i rozwiązanie to charakteryzuje się największą wydajnością [4]. Półprzewodniki w diodach LED są zazwyczaj mieszaną fosforków i arsenków (pierwiastki z III i V grupy układu okresowego, np.: arsenek galu GaAs, fosforek galu GaP, arseno-fosforek galu GaAsP o odpowiednim domieszkowaniu) [19]. Każdy z materiałów ma różne wartości przerwy energetycznej, charakterystyczne dla danego materiału półprzewodnikowego, które determinują długość fali dominującej, a tym samym barwę emitowanego światła. Będąc elementem składowym diody LED krótkofalowe (InGaAlP) wymagają znacznie wyższego napięcia zasilania niż diody LED długofalowe będące drugim elementem (InGaN). Inaczej także przebiega z czasem proces degradacji różnych rodzajów diod składowych. Cechy te muszą być uwzględniane podczas projektowania i wykonywania systemu sterującego. Tak konstruowane diody LED emitujące światło białe dają także największe możliwości kontroli emitowanego widma, im więcej długości fal mieszamy tym elastyczniej i dokładniej możemy wybierać pożądaną temperaturę barwową przy jednoczesnym zachowaniu wysokich parametrów definiujących oddawanie barw [20]. Wadami są duże koszty wytwarzania i komplikacja systemu zasilającego, szczególnie przy większej liczbie barw składowych (emiterów monochromatycznych).

Wartość wskaźnika oddawania barw mieszaniny barw jest bardzo czuła na położenie maksimów rozkładów składowych. Wymagana jest zatem termiczna i prądowa stabilizacja poszczególnych składników wieloemiterowego źródła światła białego. Zarówno maksimum intensywności widma promieniowania, jego położenie jak i szerokość widma zależą od temperatury otoczenia i temperatury samego złącza półprzewodnikowego diody LED, a także natężenia przepływającego prądu [7, 19, 21]. Wszystkie te parametry spektralno-temperaturowe i spektralno-prądowe ulegają zmianie w inny sposób i odmiennie dla różnych jednoczynnych diod LED, co powoduje m.in. dość istotną zmianę temperatury barwowej źródła.

Taka sytuacja może zostać wyeliminowana poprzez korekcję intensywności świecenia poszczególnych diod LED. Ze względu na ich starzenie (spadek wydajności w funkcji czasu eksploatacji) najlepszym rozwiązaniem

wydaje się być cykliczna kalibracja. Można to zrobić też innym sposobem – poprzez pomiar zależności rozkładu od temperatury i prądu diod LED, a następnie systematyczną korekcję rozkładu i mocy emisji według znanych ich zależności od temperatury i natężenia prądu. Problemem są jednak rozbieżności (i ich uwzględnienie) w procesie starzenia poszczególnych emiterów.



Rys. 1. Specyfikacja tolerancji chromatyczności źródeł LED według normy ANSI C78.377 (po lewej) oraz propozycja zmian z 2015 roku (po prawej) [6]

W medycynie najważniejszą barwą, której odwzorowanie jest kluczowe do właściwej pracy diagnosty lub chirurga jest barwa czerwona [5]. Przed lampami zabiegową, diagnostyczną czy też operacyjną stawiane jest wymaganie bardzo wysokiego ogólnego odwzorowania barw oraz czerwieni – zgodnie z normą PN-EN 60601-2-41:2010/A1:2015-09E [22] powinny one mieć współczynniki  $R_a$  i  $R_g > 92$ . Tolerancja chromatyczności dla poszczególnych temperatur barwowych najbliższych białych oświetleniowych diod LED zawarta jest w normie ANSI C78.377-2011 [23], stanowiącej standard przemysłowy (rys. 1).

#### Modelowanie rozkładu spektralnego źródeł o zadanej temperaturze barwowej

Konstrukcja przestrzajalnego widmowo oświetlenia podporządkowana jest dążeniu, do realizacji zmian spektrum promieniowania emitowanego zależnie od aktualnych potrzeb. Ze względu na mały pobór energii oraz szeroki zakres dostępnych charakterystyk spektralnych źródła LED wydają się być najlepszym rozwiązaniem. Dobierając zestaw diod elektroluminescencyjnych o odpowiednich parametrach, w szczególności rozkładzie spektralnym, można modelować wypadkową charakterystykę spektralną zestawu źródeł, regulować temperaturę barwową najbliższą, a także stwarzać warunki oświetlenia pomieszczeń czy obserwacji odpowiadające np. wybranej technice medycznej, której celem jest obrazowanie zmian chorobowych tkanek [24]. Najkorzystniejszym z wielu względów rozwiązaniem źródła w takim dedykowanym oświetlaczu jest zastosowanie białej diody LED dużej mocy i jednoczynnych emiterów LED o wybranych długościach fal zapewniających dopasowanie charakterystyki źródła wieloemiterowego do zakładanej wzorcowej charakterystyki spektralnej.

Przeprowadzone zostały badania laboratoryjne, których celem było określenie rzeczywistych charakterystyk spektralnych diod LED i ich zmian w funkcji zmian warunków ich pracy. Źródła umieszczono na przewymiarowanym w stosunku do potrzeb radiatorze z nawiewem powietrza z wentylatora celem zapewnienia jak najlepszego odprowadzenia ciepła w trakcie prowadzenia pomiarów - uzyskania niezmiennej temperatury. Warto przy tym zwrócić uwagę, że prowadzenie badań laboratoryjnych z zastosowaniem skomplikowanych układów stabilizacji temperaturowej emiterów w specjalistycznym sprzęcie może nie przynieść przełożenia na realne warunki ich pracy. Ze względu na fakt, że analizowany układ stanowi

urządzenie do praktycznej aplikacji, również badania laboratoryjne przeprowadzono w układzie skonfigurowanym w aktualnym rozwiązaniu technicznym.

Pomiary przeprowadzono w ciemni optycznej w temperaturze otoczenia wynoszącej 25°C. Zarejestrowano charakterystyki spektralne diod LED zasilanych stałoprądowo [25] prądami o natężeniach z zakresu określonego w karcie katalogowej każdej diody. Na tej podstawie opracowano bazę danych zestawu pozwalającą przeprowadzić symulacje wybranych wzorcowych rozkładów spektralnych – iluminantów: A, D55, D65, rozkładów Plancka o temperaturze barwowej 3500 K i 4500 K. Tolerancja temperatury barwowej najbliższej dla półprzewodnikowych źródeł światła białego określona została w normie [23] (tabela 1).

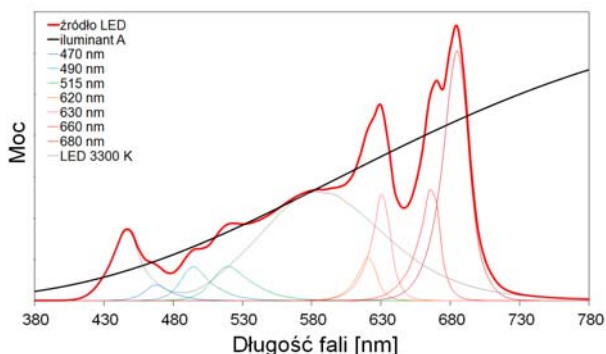
Tabela 1. Specyfikacja temperatury barwowej najbliższej dla oświetlenia półprzewodnikowego [23]

Nominalna CCT [K]	2700	3000	3500	4000	4500	5000	5700	6500
Docelowa CCT i tolerancja $\Delta T$ [K]	2725 $\pm 145$	3045 $\pm 175$	3465 $\pm 245$	3985 $\pm 275$	4503 $\pm 243$	5029 $\pm 283$	5667 $\pm 355$	6532 $\pm 510$

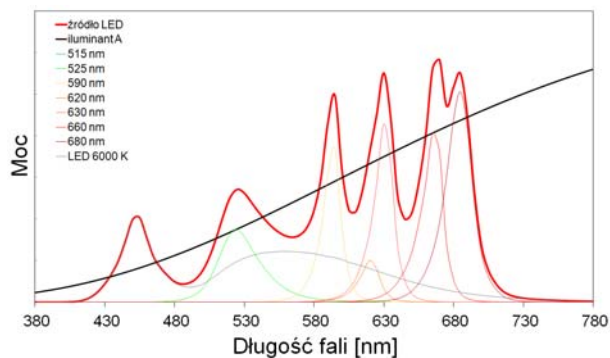
W celu sprawdzenia możliwości konstrukcji oświetlacza, który z jednej strony charakteryzowałby się rozkładem spektralnym zbliżonym do ciała doskonale czarnego, a z drugiej wysokimi współczynnikami oddawania barw  $R_a$  i szczegółowymi  $R_1-R_{14}$ , przede wszystkim  $R_9$ , przeprowadzono symulacje przykładowych możliwych charakterystyk spektralnych zestawu. Do układu wyselekcjonowano 2 diody LED białe o temperaturach barwowych najbliższych 3300 K i 6000 K emitujące maksymalne strumienie 160 lm, a także 10 monochromatycznych źródeł LED (420, 470, 490, 515, 525, 590, 620, 630, 660, 680 nm) o maksymalnej mocy dla poszczególnych diod wynoszącej (170 - 480) mW. Uzyskane charakterystyki widmowe (rys. 2 - 12) oświetlacza uwzględniają czułość widmową detektora radiometru OL-750.

### Strojenie rozkładu widmowego źródła najbliższego iluminantowi A (CCT = 2856 K)

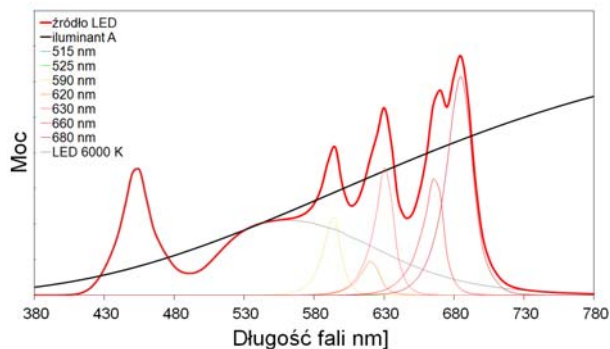
Wykorzystanie 7 wyselekcjonowanych jednobarwnych oraz jednej o ciepłej barwie diod LED (np. o temperaturze barwowej 3300 K) (rys. 5) lub chłodnej diody LED (np. o temperaturze barwowej 6000 K) i dominującym udziale światła 6 diod jednobarwnych (rys. 3) umożliwia zasymulowanie źródła o temperaturze barwowej odpowiadającej światłu ciepłobiałemu (np. CCT = 2856 K) przy zachowaniu wysokich współczynników oddawania barw - odpowiednio  $R_a > 96$  i  $R_9 > 96$  ( $R_1 + R_{14} > 94$ ) oraz  $R_a > 93$  i  $R_9 > 98$  (tab. 2).



Rys. 2. Rozkład spektralny promieniowania LED ciepłej białej (3300 K) i diod 470, 490, 515, 620, 630, 660, 680 nm odwzorowujący rozkład widmowy iluminantu A o temperaturze barwowej 2856 K



Rys. 3. Rozkład spektralny promieniowania LED chłodnej białej (6000 K) i diod 525, 590, 620, 630, 660, 680 nm odwzorowujący rozkład widmowy iluminantu A o temperaturze barwowej 2856 K



Rys. 4. Rozkład spektralny promieniowania LED chłodnej białej (6000 K) i diod 590, 620, 630, 660, 680 nm odwzorowujący rozkład widmowy iluminantu A o temperaturze barwowej 2856 K

Tabela 2. Wskaźniki oddawania barw wieloemiterowych źródeł LED z rysunków 2-4

Wskaźnik oddawania barw	$R_a$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$	$R_7$	$R_8$	$R_9$
Rys. 2	<b>96,8</b>	97,9	98,4	96,9	93,9	97,6	97,2	95,6	96,6	<b>96,7</b>
Rys. 3	<b>93,4</b>	93,1	97,0	95,4	85,8	92,2	92,4	95,0	96,6	<b>98,2</b>
Rys. 4	<b>92,8</b>	96,3	92,7	94,1	90,7	96,6	89,4	88,5	94,3	<b>96,1</b>

Tabela 3. Temperatura barwowa najbliższa (CCT) oraz współrzędne przestrzeni barw (x, y) źródła odniesienia (iluminantu A) i wieloemiterowego zestawu źródeł LED oraz odchyłki ( $\Delta$  = (wartość dla iluminantu) - (wartość dla zestawu)) pomiędzy tymi źródłami

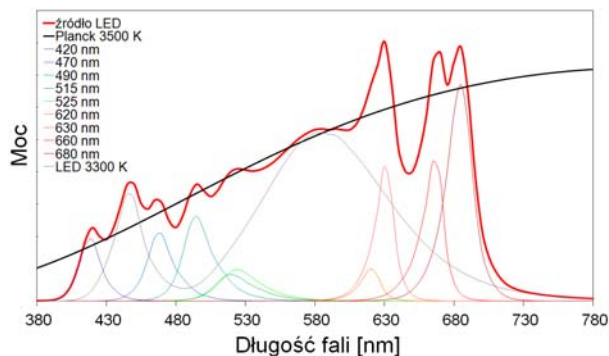
	iluminant A	Rys. 2		Rys. 3		Rys. 4	
		źródło LED	$\Delta$	źródło LED	$\Delta$	źródło LED	$\Delta$
CCT [K]	2856	2856	0	2856	0	2856	0
x	0,4475	0,4389	0,0087	0,4379	0,0096	0,4121	0,0354
y	0,4074	0,3907	0,0167	0,3889	0,0186	0,3392	0,0683

Nie jest możliwe przy wykorzystaniu wyselekcjonowanych LED jednobarwnych i chłodnej białej LED (np. o temperaturze barwowej 6000 K) (rys. 4) zasymulowanie źródła o niskiej temperaturze barwowej (np. CCT = 2856 K) i wysokim współczynniku oddawania barw przy dominującym wpływie światła diody białej - współrzędne chromatyczne x,y (tab. 3) źródła nie spełniają kryterium odchylenia od punktu chromatyczności odniesienia wg normy ANSI C78.377-2011 (rys. 13).

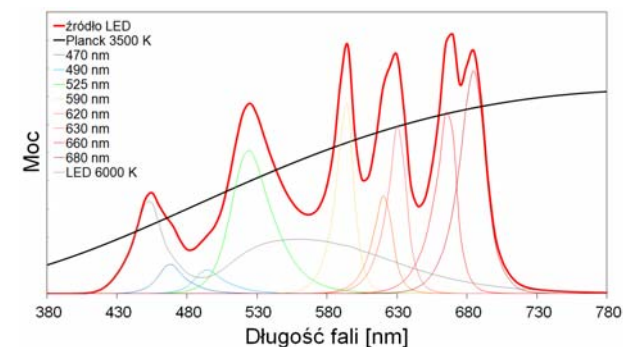
### Strojenie rozkładu widmowego źródła najbliższego rozkładowi Planck'a o temperaturze barwowej CCT = 3500 K

Wykorzystanie wyselekcjonowanych 9 jednobarwnych oraz jednej o ciepłej barwie diod LED (np. o temperaturze barwowej 3300 K) (rys. 5) lub chłodnej diody LED (np. o

temperaturze barwowej 6000 K) i dominującym udziale światła 8 LED jednobarwnych (rys. 6) umożliwi zasymulowanie źródła o temperaturze barwowej odpowiadającej światłu neutralnemu (np. CCT = 3500 K) przy zachowaniu wysokich współczynników oddawania barw - odpowiednio  $R_a > 97$  i  $R_9 > 98$  ( $R_1 \div R_{14} > 96$ ) oraz  $R_a > 92$  i  $R_9 > 95$ , tab. 4.



Rys. 5. Rozkład spektralny promieniowania LED ciepłej białej (3300 K) i diod 420, 470, 490, 515, 525, 620, 630, 660, 680 nm odwzorowujący rozkład widmowy Planck'a o temperaturze barwowej 3500 K



Rys. 6. Rozkład spektralny promieniowania LED chłodnej białej (6000 K) i diod 470, 490, 525, 590, 620, 630, 660, 680 nm odwzorowujący rozkład widmowy Planck'a o temperaturze barwowej 3500 K

Tabela 4. Wskaźniki oddawania barw wieloemiterowych źródeł LED

Wskaźnik oddawania barw	$R_a$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$	$R_7$	$R_8$	$R_9$
Rys. 5	<b>97,7</b>	98,6	98,2	98,4	96,7	98,2	96,5	96,9	97,9	<b>98,4</b>
Rys. 6	<b>92,2</b>	88,9	97,8	93,5	82,4	90,3	92,9	96,7	94,9	<b>95,6</b>

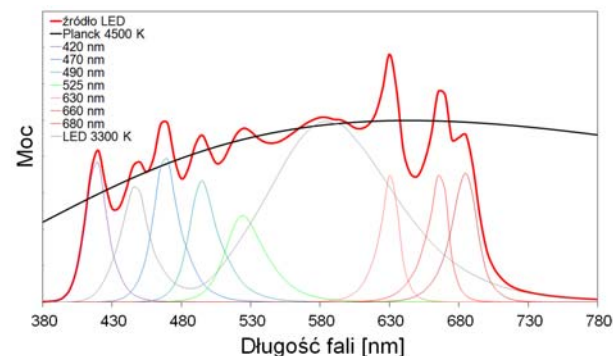
Tabela 5. Temperatura barwowa najbliższa (CCT) oraz współrzędne przestrzeni barw (x, y) źródła odniesienia (rozkładu Plancka 3500 K) i wieloemiterowego zestawu źródeł LED oraz odchyłki ( $\Delta$  = (wartość dla iluminantu) - (wartość dla zestawu)) pomiędzy tymi źródłami

	rozkład Planck'a	Rys. 5		Rys. 6	
		źródło LED	$\Delta$	źródło LED	$\Delta$
CCT [K]	3500	3500	0	3500	0
x	0,4053	0,3995	0,0058	0,4108	-0,0055
y	0,3907	0,3751	0,0156	0,4054	-0,0147

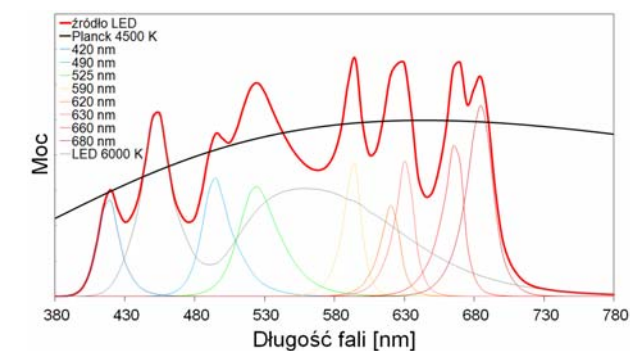
### Strojenie rozkładu widmowego źródła najbliższego rozkładowi Planck'a o temperaturze barwowej CCT = 4500 K

Wykorzystanie wyselekcjonowanych 9 jednobarwnych oraz jednej o ciepłej barwie diod LED (np. o temperaturze barwowej 3300 K) (rys. 7) lub chłodnej diody LED (np. o temperaturze barwowej 6000 K) i dominującym udziale światła 8 LED jednobarwnych (rys. 8) umożliwi zasymulowanie źródła o temperaturze barwowej 4500 K

przy zachowaniu wysokich współczynników oddawania barw - odpowiednio  $R_a > 98$  i  $R_9 > 98$  ( $R_1 \div R_{14} > 97$ ) oraz  $R_a > 95$  i  $R_9 > 97$ , tab. 6.



Rys. 7. Rozkład spektralny promieniowania LED ciepłej białej (3300 K) i diod 420, 470, 490, 525, 630, 660, 680 nm odwzorowujący rozkład widmowy Planck'a o temperaturze barwowej 4500 K



Rys. 8. Rozkład spektralny promieniowania LED chłodnej białej (6000 K) i diod 420, 490, 525, 590, 620, 630, 660, 680 nm odwzorowujący rozkład widmowy Planck'a o temperaturze barwowej 4500 K

Tabela 6. Wskaźniki oddawania barw wieloemiterowych źródeł LED

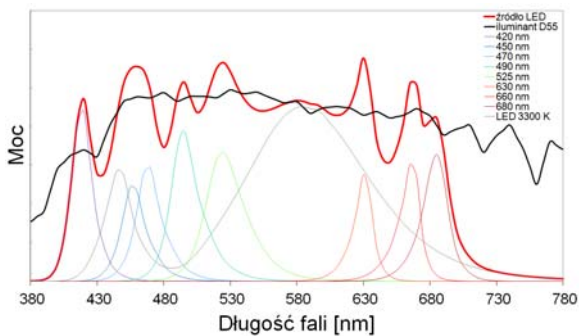
Wskaźnik oddawania barw	$R_a$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$	$R_7$	$R_8$	$R_9$
Rys. 7	<b>98,3</b>	98,8	98,5	98,3	98,9	98,5	97,0	97,8	98,6	<b>98,2</b>
Rys. 8	<b>95,1</b>	93,4	98,7	95,9	88,4	93,8	95,9	97,6	97,0	<b>97,6</b>

Tabela 7. Temperatura barwowa najbliższa (CCT) oraz współrzędne przestrzeni barw (x, y) źródła odniesienia (rozkładu Plancka 4500 K) i wieloemiterowego zestawu źródeł LED oraz odchyłki ( $\Delta$  = (wartość dla iluminantu) - (wartość dla zestawu)) pomiędzy tymi źródłami

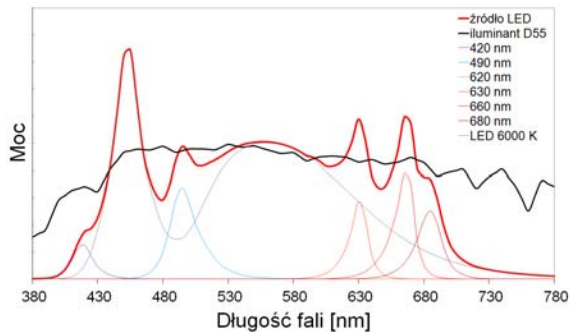
	rozkład Planck'a	Rys. 7		Rys. 8	
		źródło LED	$\Delta$	źródło LED	$\Delta$
CCT [K]	4500	4500	0	4500	0
x	0,3608	0,3600	0,0008	0,3624	-0,0016
y	0,3635	0,3589	0,0047	0,3728	-0,0093

### Strojenie rozkładu widmowego źródła najbliższego iluminantowi D55 (CCT = 5500 K)

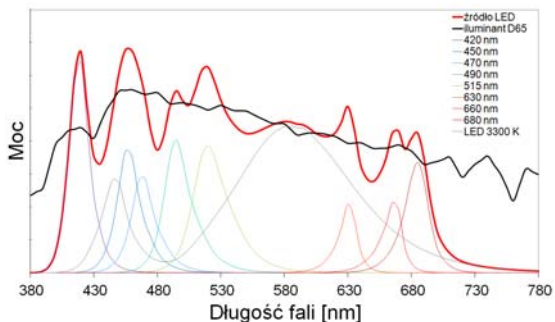
Wykorzystanie wyselekcjonowanych 9 jednobarwnych oraz jednej o ciepłej barwie diod LED (np. o temperaturze barwowej 3300 K) (rys. 9) lub chłodnej diody LED (np. o temperaturze barwowej 6000 K) i dominującym udziale światła 8 LED jednobarwnych (rys. 10) umożliwi zasymulowanie źródła o temperaturze barwowej odpowiadającej światłu dziennemu (np. CCT = 5500 K) przy zachowaniu wysokich współczynników oddawania barw - odpowiednio  $R_a > 99$  i  $R_9 > 99$  ( $R_1 \div R_{14} > 97$ ) oraz  $R_a > 96$  i  $R_9 > 95$ , tab. 8.



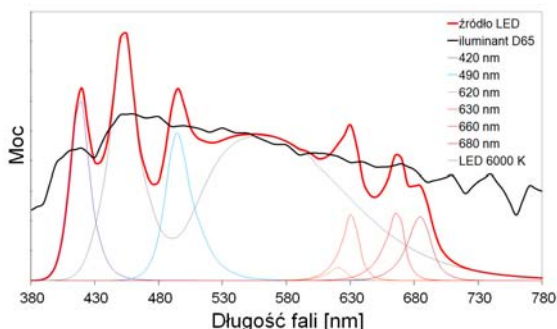
Rys. 9. Rozkład spektralny promieniowania LED ciepłej białej (3300 K) i diod 420, 450, 470, 490, 525, 630, 660, 680 nm odwzorowujący rozkład widmowy iluminantu D55



Rys. 10. Rozkład spektralny promieniowania LED chłodnej białej (6000 K) i diod 420, 630, 660, 680 nm odwzorowujący rozkład widmowy iluminantu D55



Rys. 11. Rozkład spektralny promieniowania LED ciepłej białej (3300 K) i diod 420, 490, 525, 630, 660, 680 nm odwzorowujący rozkład widmowy iluminantu D65



Rys. 12. Rozkład spektralny promieniowania LED chłodnej białej (6000 K) i diod 420, 470, 490, 525, 630, 660, 680 nm odwzorowujący rozkład widmowy iluminantu D65

Tabela 8. Wskaźniki oddawania barw wieloemiterowych źródeł LED

Wskaźnik oddawania barw	$R_a$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$	$R_7$	$R_8$	$R_9$
Rys. 9	99,0	98,8	99,8	99,2	97,3	98,9	98,9	99,6	99,4	99,2
Rys. 10	96,4	98,0	97,3	94,1	96,7	97,6	93,3	96,9	97,6	95,9

Tabela 9. Temperatura barwowa najbliższa (CCT) oraz współrzędne przestrzeni barw (x, y) źródła odniesienia (iluminantu D55) i wieloemiterowego zestawu źródeł LED oraz odchyłki ( $\Delta$  = (wartość dla iluminantu) – (wartość dla zestawu)) pomiędzy tymi źródłami

	iluminant D55	Rys. 9		Rys. 10	
		źródło LED	$\Delta$	źródło	$\Delta$
CCT [K]	5500	5500	0	5500	0
x	0,3324	0,3325	0,0000	0,3322	0,0002
y	0,3410	0,3477	-0,0067	0,3363	0,0047

### Strojenie rozkładu widmowego źródła najbliższego iluminantowi D65 (CCT = 6500 K)

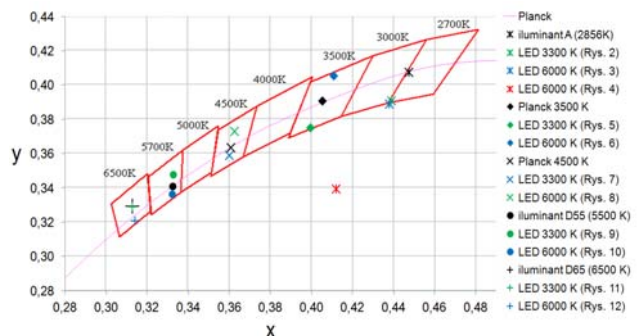
Wykorzystanie wyselekcjonowanych 6 jednobarwnych oraz jednej o ciepłej barwie diod LED (np. o temperaturze barwowej 3300 K) (rys. 11) lub chłodnej diody LED (np. o temperaturze barwowej 6000 K) i 5 LED jednobarwnych (rys. 12) umożliwiła zasymulowanie źródła o temperaturze barwowej CCT = 6500 K i wysokich współczynników oddawania barw - odpowiednio  $R_a > 97$  i  $R_9 > 98$  ( $R_1 \div R_{14} > 95$ ) oraz  $R_a > 97$  i  $R_9 > 98$ , tab. 11.

Tabela 10. Wskaźniki oddawania barw wieloemiterowych źródeł LED

Wskaźnik oddawania barw	$R_a$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$	$R_7$	$R_8$	$R_9$
Rys. 11	97,9	97,4	99,2	97,9	95,2	97,2	97,1	99,7	99,4	98,9
Rys. 12	97,1	98,9	98,1	96,5	95,3	98,7	96,5	96,2	96,8	98,7

Tabela 11. Temperatura barwowa najbliższa (CCT) oraz współrzędne przestrzeni barw (x, y) źródła odniesienia (iluminantu D65) i wieloemiterowego zestawu źródeł LED oraz odchyłki ( $\Delta$  = (wartość dla iluminantu) – (wartość dla zestawu)) pomiędzy tymi źródłami

	iluminant D65	Rys. 11		Rys. 12	
		źródło LED	$\Delta$	źródło LED	$\Delta$
CCT [K]	6500	6500	0	6500	0
x	0,3128	0,3128	-0,0001	0,3139	-0,0011
y	0,3291	0,3289	0,0001	0,3209	0,0081



Rys. 13. Wykres chromatyczności x,y iluminantów i przebadanych wieloemiterowych zestawów diod LED

Dla każdego źródła określono współrzędne chromatyczne x, y (tab. 3, 5, 7, 9, 11) i następnie na ich podstawie wyrysowano wykres zgodności opracowanych źródeł (ich współrzędnych chromatycznych x, y) ze standardami American National Standard for Electric Lamps [23] (rys. 13). Opracowane źródła, poza zestawem nr 3, spełniają wymagania zgodności temperatury barwowej najbliższej i wysokich współczynników oddawania barw -  $R_a > 92$ ,  $R_9 > 96$ . Pozostałe źródła charakteryzowały się odchyłkami  $\Delta x < 0,01$  i  $\Delta y < 0,02$ , a dla źródeł o temperaturach barwowych 4500, 5500 i 6500 K uzyskano bardzo dobrą zgodność  $\Delta x < 0,02$  i  $\Delta y < 0,01$ .

## Wnioski

Sumaryczna charakterystyka spektralna wieloemiterowego oświetlacza ledowego zależy od wymagań oświetleniowych lub diagnostycznych i możliwe jest jej zmienianie poprzez włączanie lub wyłączanie wybranych źródeł oraz sterowanie natężeniem prądu płynącego przez poszczególne źródła. Zaletą takiego rozwiązania jest jego prostota, niskie zużycie energii, a także brak promieniowania nadfioletowego i podczerwonego. Szczególnie istotna jest możliwość wpływania na temperaturę barwową najbliższą źródła przy zachowaniu wysokich szczegółowych współczynników oddawania barw.

Zastosowanie w oświetleniu ciepłej diody LED daje znacznie większe możliwości sterowania temperaturą barwową źródła – przy zachowaniu wysokiej jakości odwzorowania barw oświetlanych obiektów – niż użycie diody LED chłodnej, aczkolwiek oba źródła umożliwiają spełnienie kryterium odchylenia od punktu chromatyczności odniesienia wg normy ANSI C78.377-2011 [23] (rys. 13) przy jednoczesnym prawie idealnym oddawaniu barw. Możliwe jest spełnienie wymagań dotyczących wysokiej jakości oddawania barw ( $R_a > 96$  i  $R_g > 96$ ) w szerokim zakresie przestrajania temperatury barwowej źródła (2856 - 6500) K, które jest kluczowe do właściwej pracy diagnosty lub chirurga. Jeszcze lepsze efekty można uzyskać wykorzystując jednocześnie diody LED emitujące światło białe chłodne i ciepłe oraz uzupełnienie prześwitów w widmie tego źródła światłem jednobarwnych diod LED. Aktualnie w Katedrze Elektroenergetyki, Fotoniki i Techniki Świetlnej prowadzone są prace mające na celu opracowanie takich źródeł oraz ich aplikację w oświetleniu ogólnym oraz w medycynie.

Zasymulowane źródło LED może znaleźć zastosowanie w oświetlaniu pomieszczeń, a także w medycynie w sytuacjach wymagających spełnienia szczególnie wysublimowanych parametrów związanych z analizą obrazu pola oświetlanego.

Publikację przygotowano w ramach realizacji pracy statutowej S/WE/4/2013 w Katedrze Elektroenergetyki, Fotoniki i Techniki Świetlnej w roku 2015.

**Autorzy:** dr inż. Łukasz Gryko, Politechnika Białostocka, Katedra Elektroenergetyki, Fotoniki i Techniki Świetlnej, Białystok, ul. Wiejska 45D, tel.: 857469422, e-mail: [l.gryko@pb.edu.pl](mailto:l.gryko@pb.edu.pl),  
dr inż. Urszula Joanna Błaszczak, Politechnika Białostocka, Katedra Elektroenergetyki, Fotoniki i Techniki Świetlnej, Białystok, ul. Wiejska 45D, tel.: 857469447, e-mail: [u.blaszczak@pb.edu.pl](mailto:u.blaszczak@pb.edu.pl)

## LITERATURA

- [1] Bruno T. J., Svoronos P. D., CRC handbook of fundamental spectroscopic correlation charts, CRC Press, 2005
- [2] Żagan W., Podstawy techniki świetlnej, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2014
- [3] DiLaura D. L., Houser K. W., Mistrick R. G., Steffy G. R., The lighting handbook, Illuminating Engineering Society, 2011
- [4] Rudziński M., Wesółowski M., Strupiński W., Niebieskie, zielone i białe emiterzy światła wytwarzane z półprzewodników AlIn-BN, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2014), nr 7, 1-13
- [5] Błaszczak U., Gryko Ł., Zając A., Wybrane zagadnienia dotyczące projektowania charakterystyki spektralnej układu oświetlającego do zastosowań medycznych na przykładzie oświetlacza endoskopu, *Przegląd Elektrotechniczny*, 91 (2015),

- nr 11, 326-329
- [6] Ohno Y., Fundamentals of Colorimetry and Practical Color Measurements, *Lamp Performance Testing Training Workshop*, Beijing, April 22-24, 2015
- [7] Schubert E. F., Gessmann T., Kim J. K., Light emitting diodes. *John Wiley & Sons, Inc.*, 2005
- [8] Oleksy M., Kraśniewski J., Janke W., Wpływ temperatury na charakterystyki optyczne i elektryczne diod LED mocy, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2014), nr 9, 83-85
- [9] Sheu J. K., Chang S. J., Kuo C. H., Su Y. K., Wu L. W., Lin Y. C., Wu R. K., White-light emission from near UV InGaN-GaN LED chip precoated with blue/green/red phosphors, *Photonics Technology Letters, IEEE*, 15 (2003), nr 1, 18-20
- [10] Nishida T., Ban T., Kobayashi N., High-color-rendering light sources consisting of a 350-nm ultraviolet light-emitting diode and three-basal-color phosphors, *Applied physics letters*, 82 (2003), nr 22, 3817-3819
- [11] Xie R. J., Hirotsuki N., Silicon-based oxynitride and nitride phosphors for white LEDs-A review, *Science and Technology of Advanced Materials*, 8 (2007), nr 7, 588-600
- [12] Muthu S., Schuurmans F. J., Pashley M. D., Red, green, and blue LED based white light generation: issues and control, *Industry Applications Conference*, 8 (2002), nr 2, 327-333
- [13] Narukawa Y., White-light LEDs, *Optics and photonics news*, 15 (2004), nr 4, 24-29
- [14] Bogner G., Debray A., Heide G., Hoehn K., Mueller U., Schlotter P., White LED, *Proc. SPIE*, 3621 (1999), 143-150
- [15] Muthu S., Schuurmans F. J., Pashley M. D. Red, green, and blue LEDs for white light illumination, *Industry Applications Conference*, 8 (2002), nr 2, 333-338
- [16] D'Andrade B. W., Forrest S. R., White organic light-emitting devices for solid-state lighting, *Advanced Materials*, 16 (2004), nr 18, 1585-1595
- [17] Guo X., Graff J., Schubert E. F., Photon recycling semiconductor light emitting diode. In: *Electron Devices Meeting, IEEE*, 1999, 600-603
- [18] Baldo M. A., O'Brien D. F., You Y., Shoustikov A., Sibley S., Thompson M. E., Forrest S. R., Highly efficient phosphorescent emission from organic electroluminescent devices, *Nature*, 6698 (1998), nr 395, 151-154
- [19] Chou H. Y., Yang T. H., Dependence of emission spectra of LEDs upon junction temperature and driving current, *Journal of Light & Visual Environment*, 32 (2008), nr 2, 183-186
- [20] Speier I., Salsbury M., Color temperature tunable white light LED system. *Proc. SPIE.*, 6337 (2006), 63371F-63371F
- [21] Chhajed S., Xi Y., Gessmann T., Xi J. Q., Shah J. M., Kim J. K., Schubert E. F., Junction temperature in light-emitting diodes assessed by different methods, *Proc. SPIE*, 5739 (2005), 16-24
- [22] Norma PN-EN 60601-2-41:2010/A1:2015-09E - Medyczne urządzenia elektryczne - Część 2-41: Wymagania szczegółowe dotyczące bezpieczeństwa podstawowego oraz funkcjonowania zasadniczego opraw chirurgicznych i opraw diagnostycznych, 2015
- [23] Norma ANSI C78.377-2011, American National Standard for Electric Lamps - Specifications for the Chromaticity of Solid State Lighting (SSL) Products, 2011
- [24] Zając A., Kasprzak J., Urbański Ł., Gryko Ł., Szamańska J., Maciejewska M., Światło w diagnostyce medycznej, w: *Metrologia w medycynie – wybrane zagadnienia*, (2011), 219-298
- [25] Gilewski M., Wielokanałowy, stałoprądowy układ zasilania zespołów LED dużej mocy, *Przegląd Elektrotechniczny*, 86 (2010), nr 10, 193-196

prof. dr hab. inż. Andrzej Zając, Politechnika Białostocka, Katedra Elektroenergetyki, Fotoniki i Techniki Świetlnej, Białystok, ul. Wiejska 45D, tel.: 857469416, e-mail: [andrzej.zajac@wat.edu.pl](mailto:andrzej.zajac@wat.edu.pl),  
inż. Anna Palkowska, Politechnika Białostocka, studentka.