

## Badanie wpływu sposobu zasilania na wybrane parametry optyczne zestawu diod elektroluminescencyjnych

**Streszczenie.** Dobierając sposób zasilania można w ograniczonym zakresie sterować parametrami optycznymi źródeł światła zawierających diody elektroluminescencyjne. W referacie przedstawiono wyniki pomiarów zmiany tych parametrów dla zestawu diod. Dotyczyły one zmian: mocy optycznej, długości fali dla której występuje maksimum emisji oraz szerokości połowkowej. Zamieszczono również przykładowe wyniki pomiarów widmowych charakterystyk badanego układu z zastosowaniem kamery smugowej.

**Abstract.** By proper design of the power supply it is possible to control, in limited extent, optical parameters of light sources consisting of light-emitting diodes. The paper presents results of measurements of selected optical parameters changes for the set of LEDs. These changes concerned: optical power, wavelength of maximum emissions, and half-width. Sample results of measurements of the spectral characteristics tested system using streak camera were also presented. (Investigation of the supply influence to chosen optical parameters of the LEDs set).

**Słowa kluczowe:** LED, parametry optyczne, zasilanie stałoprądowe, PWM.

**Keywords:** LED, optical parameters, DC supply, PWM Dimming.

### Wstęp

Użytkownicy ledowych systemów oświetleniowych nie przywiązują większej wagi do charakterystyk technicznych układów zasilających. Na pierwszym planie kategoryzacji pojawia się efekt estetyczny, następnie przewidywana żywotność źródła, jego koszt jednostkowy i ewentualnie sprawność energetyczna. Praktycznie pomija się sposób zasilania i związane z nim skutki - w tym zdrowotne. Producenci systemów oświetleniowych, z przyczyn komercyjnych, są oszczędni w podawaniu szczegółowych informacji technicznych. Z tego względu, umyka uwadze rodzaj zastosowanego zasilania oraz jego wpływ na jakość wytwarzanego światła. Konstruktorzy ledowych lamp oświetleniowych, zdeterminowani redukcją kosztów wytwarzania i wzrostem sprawności energetycznej, bezkrytycznie przenoszą do specyficznego obszaru techniki oświetleniowej "sprawdzone" aplikacje, np. z zakresu energoelektroniki. W takim podejściu obca jest refleksja nad długookresowymi konsekwencjami zaśmieczenia środowiska światłem o parametrach czasowych i widmowych nie spełniających warunku neutralnego oddziaływania na organ wzroku. Sytuację komplikuje fakt, iż nie istnieją normy dla oświetlenia światłem białym, które definiowałyby standardy neutralnego oddziaływania oświetlenia na człowieka w okresie długofalowym, np. 30-letnim. Równie ważnym aspektem wpływającym na wartość strumienia świetlnego i parametry kolorymetryczne, takie jak współczynnik oddawania barw i temperatura barwowa, jest zależność parametrów optycznych źródła od natężenia prądu złącza półprzewodnikowego emitera i jego temperatury.

Celem artykułu jest ekspozycja różnic w zakresie parametrów optycznych LED-ów, zasilanych stałoprądowo, prądem o zmiennym natężeniu oraz okresowym sygnałem zmiennym oraz porównanie istotnych w tym zakresie cech obu rodzajów układów zasilających zarówno pojedyncze elementy, jak i zestawy diod.

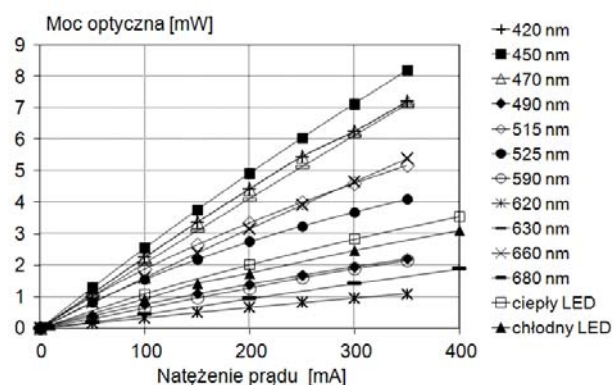
### Uwarunkowania techniczne

Układy zasilające diod elektroluminescencyjnych można sklasyfikować jako dwie podstawowych kategorie: układy zasilania stałoprądowego (DC) oraz układy zasilania impulsowego, w których często stosuje się modulację szerokości impulsu (PWM). Porównując cechy promieniowania optycznego wytwarzanego przez LED-y zasilane stałoprądowo oraz impulsowo daje się zauważyć szereg istotnych różnic. W układach stałoprądowych otrzymujemy światło stabilne w czasie i pozbawione

zakłóceń, jednak towarzyszące jego wytwarzaniu układy zasilające charakteryzują się większą złożonością oraz mniejszą sprawnością energetyczną i wyższymi kosztami. Tanie, przestrajalne cyfrowo układy impulsowe wytwarzają promieniowanie "zaśmieczone" wyższymi harmonicznymi, które są trudno mierzalne. Długookresowe skutki oddziaływania światła impulsowego na organizm ludzki nie są jeszcze rozpoznane ze względu na krótki upływ czasu stosowania takiego rodzaju oświetlenia. W następnej części pracy krótko scharakteryzowano wpływ powyższych rodzajów zasilania na wybrane parametry optyczne promieniowania diod LED.

### Zasilanie stałoprądowe diod elektroluminescencyjnych

Zasilanie stałoprądowe jest historycznie najstarszą metodą sterowania diod elektroluminescencyjnych. Z nachylenia charakterystyki prądowo-napięciowej diody [1] wynika, iż większą stabilność punktu pracy uzyskuje się kontrolując natężenie prądu niż spadek napięcia na diodzie. Charakterystyka konwersji prąd/moc promieniowania optycznego diod LED dużej mocy (Tab.2) nie jest w przypadku zasilania stałoprądowego funkcją liniową, jej sprawność spada wraz ze wzrostem natężenia prądu - dla poszczególnych diod przy wzroście prądu z 50 mA do 350 mA spadek sprawności konwersji wynosi od 1% do 49%, średnio o 17% (Rys.1).



Rys.1. Charakterystyki konwersji prąd / moc optyczna zestawu LED-ów monochromatycznych i białych

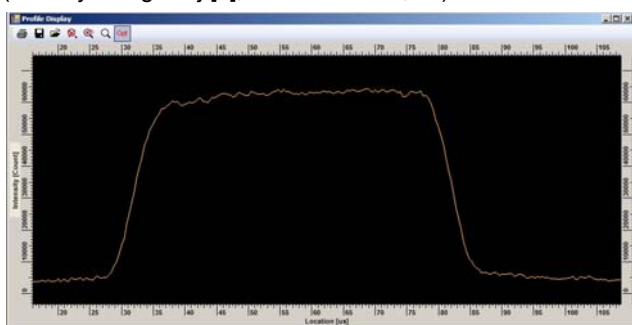
W najprostszym układzie polaryzacji stałoprądowej stosuje się pasywny układ zawierający szeregowo z diodą włączony rezystor. Im wartość rezystancji szeregowej jest

wyższa tym bardziej stabilny jest punkt pracy emitera oraz mniejsza sprawność energetyczna całego układu. Wraz z rozwojem technologii sterowników półprzewodnikowych powstały opracowania oparte na aktywnych źródłach prądowych o dużej rezystancji wewnętrznej. Zapewniają one bardziej stabilną pracę w warunkach większej sprawności energetycznej układu sterującego. Są to zazwyczaj konfiguracje czwórnikowe, w których występuje sterowany wzmacniacz prądowy [3].

### Zasilanie PWM a kształt charakterystyk emisyjnych

Alternatywną, bardzo rozpowszechnioną techniką zasilania LED-ów, w stosunku do zasilania stałoprądowego, jest zasilanie impulsowe. Układy aplikacyjne zasilania impulsowego mogą też występować w postaci źródeł prądowych, kluczowanych sygnałem cyfrowym z modulacją PWM. W tym przypadku przepływ prądu zasilającego nie następuje w sposób ciągły lecz impulsowy, powtarzany z częstotliwością powyżej 100 Hz w celu uniknięcia efektu migotania. Najczęściej jest to częstotliwość około 10 kHz, wynikająca z uwarunkowań technologicznych elementów sterownika.

W dalszej części publikacji skoncentrowano się na przedstawieniu wyników pomiarów wpływu zasilania impulsowego na widmowe charakterystyki emisyjne wieloelementowego źródła LED. Podstawową zależnością jest odpowiedź czasowa strumienia świetlnego na impulsowe pobudzenie prądowe. Obiektem badań była czerwona LED małej mocy, zasilana impulsami prądowymi o 50% współczynnika wypełnienia i częstotliwości powtarzania 10 kHz. W efekcie otrzymano przebieg odpowiedzi czasowej przedstawionej na rysunku 2. Kolor tła i opis osi rysunku wynikają z firmowych ustawień przyrządu pomiarowego (kamery smugowej Hamamatsu [4]). Analizując kształt odpowiedzi, wyraźnie widać, iż odbiega od sygnału prostokątnego, zwłaszcza w kontekście czasów narastania oraz nachylenia i niesymetrii zboczy impulsu. Oscylacyjny przebieg w stanie ustalonym można tłumaczyć faktem występowania szumu w torze pomiarowym stanu ustalonego prądu zasilającego. Zatem, w rzeczywistych układach nie można zakładać, że kształt impulsowego sygnału świetlnego LED w pełni odwzorowuje kształt prądu zasilającego. Kolor tła i opisy osi rysunku wynikają z firmowych ustawień systemu przyrządu pomiarowego (kamery smugowej [4], liczba fotonów, us).

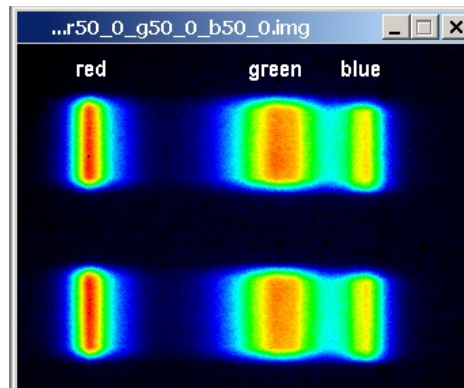


Rys.2. Odpowiedź czasowa strumienia świetlnego na pobudzenie sygnałem symetrycznym 10 kHz

Podczas przeprowadzonych badań nie zarejestrowano różnic w widmowej charakterystyce diody w sytuacji zasilania stałoprądowego i impulsowego. W obu przypadkach maksymalna gęstość spektralna promieniowania diody przypadła dla długości fali 644 nm.

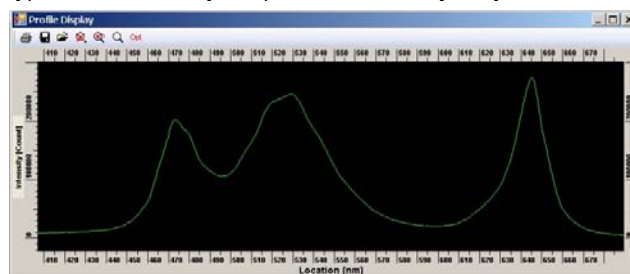
Z inną sytuacją mamy do czynienia w przypadku impulsowego zasilania oświetlacza ledowego, stanowiącego zbiór elementów różniących się charakterystykami widmowymi. Bardzo prostym modelem takiej struktury jest trój-

emiterowa LED RGB. W oświetlaczu wieloemiterowym, oprócz możliwości regulacji współczynników wypełnienia prądów zasilających, istnieje możliwość realizacji opóźnień ich wzajemnego położenia. Zmiana współczynnika wypełnienia jest parametrem regulacji amplitudy strumienia świetlnego. Stąd sygnały świetlne o mniejszym współczynniku wypełnienia postrzegane są jako o niższej mocy od sygnałów o wyższym wypełnieniu. Górną granicą jest 100% wypełnienie impulsu, odpowiadające zasilaniu stałoprądowemu.

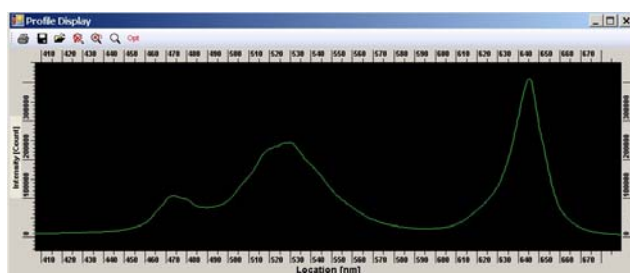


Rys.3. Odwzorowanie widmowo-czasowe mierzonego sygnału

W przypadku sterowania składowych LED RGB sygnałami impulsowymi o różnych współczynnikach wypełnienia, możliwe jest modelowanie wypadkowej widmowej charakterystyki emisyjnej. Przykładem tego są wyniki przedstawione na rysunkach 3 i 4. Obraz na rysunku 3 jest odwzorowaniem zmierzonego sygnału w postaci graficznej w systemie kamery smugowej. Jego oś pozioma odpowiada odwróconej skali długości fali. Najbardziej na lewo położone jest stosunkowo wąskie pasmo promieniowania składowej R - barwne poziome odwzorowują poziomy mocy promieniowania, czerwony obszar dotyczy długości fal o największej gęstości mocy. Szerokie, środkowe pasmo promieniowania związane jest ze światłem zielonym. Najbardziej na prawo położone jest widmo składowej B o najmniejszej amplitudzie. Oś pionowa to skala czasu mierzonych impulsów świetlnych. W tym przypadku wszystkie składowe monochromatyczne były wyzwalane synchronicznie impulsami o 50% współczynniku wypełnienia i zerowych opóźnieniach wzajemnych.

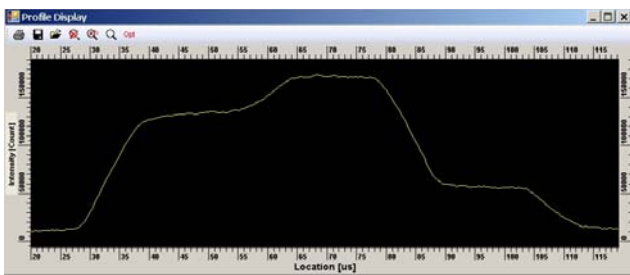


Rys.4. Wypadkowa charakterystyka widmowa badanej LED RGB



Rys.5. Wypadkowa ch. widmowa dla: R = 75%, G = 25% i G = 50%

W wyniku analizy otrzymanego obrazu widmowo-czasowych zależności, wyznaczona została wypadkowa charakterystyka widmowa LED RGB (Rys.4). Jest ona superpozycją trzech składowych monochromatycznych (R, G i B). Zatem w cyfrowy sposób manipulując nastawami współczynników wypełnienia prądów składowych monochromatycznych, można modelować charakterystykę widmową oświetlacza. Na rysunku 5 przedstawiono wyniki pomiarów dla różnych wartości współczynników wypełnienia. W przypadku tej samej LED RGB zmieniono: współczynnik wypełnienia składowej czerwonej z 50% na 75%, składowej niebieskiej z 50% na 25% zaś składową zieloną pozostawiono na poziomie 50%. W efekcie w obszarze dominowania składowej zielonej kształt charakterystyki nie uległ zmianie, w zakresie składowej niebieskiej charakterystyka uległa obniżeniu, zaś w obszarze składowej czerwonej nastąpiło podbicie.



Rys.6. Wypadkowa charakterystyka czasowa badanej LED RGB

W opisany sposób można również kształtować odpowiedź czasową strumienia świetlnego. W tym przypadku parametrami sterującymi są wzajemne przesunięcia fazowe prądów zasilających. Przykładem może być charakterystyka czasowa przedstawiona na rysunku 6. Uzyskano ją wykorzystując tę samą LED RGB, w której składowa R była zasilana impulsem prądowym o 75% współczynnika wypełnienia i zerowym przesunięciu fazowym, składowa G była zasilana prądem o 50% współczynnika wypełnienia i również zerowym współczynnika wypełnienia, zaś składową B zasilano prądem o 25% wypełnieniu i 90° przesunięciu fazowym. Jednoczesna zmiana współczynników wypełnienia i opóźnienia fazowego pozwala modelować odpowiedź czasową zarówno w kierunku osi czasu jak i amplitudy.

Zatem dysponując wielowyjściowym, sterowanym cyfrowo, układem zasilającym i matrycowym zestawem LED-ów, można w szerokim zakresie kształtować zarówno widmowe jak i czasowe charakterystyki emisyjne źródła.

### Wpływ natężenia prądu na wybrane parametry optyczne LED

W wielu zastosowaniach diod elektroluminescencyjnych wymagana jest stabilizacja charakterystyk chromatycznych pojedynczych źródeł jak i ich zestawów tworzących źródło światła białego. Temperatura złącza p-n i natężenie prądu złącza są ważnymi czynnikami wpływającymi na optyczne właściwości diod [5-7], których optyczne charakterystyki emisyjne są zmienne w czasie [5, 8].

W czasie przepływu prądu elektrycznego przez strukturę diody część energii elektrycznej zamieniana jest na energię świetlną, a reszta na ciepło [5]. W związku z tym, im więcej ciepła zaabsorbują złącze tym wyższa będzie jego temperatura, powodując spadek wydajności kwantowej i długofalowy dryft charakterystyk widmowych [5].

W warunkach stałej temperatury złącza, wzrost natężenia prądu emitera wpływa na kierunek przesunięcia widma emisyjnego, który zależy od technologicznego składu źródła [9-13]. Długość fali maksymalnej emisji przy

stałej temperaturze i wzroście natężenia prądu przesuwają się w kierunku fal krótszych dla LED opartych na związkach azotku - przesunięcie takie nie jest obserwowane dla diod opartych na strukturach fosforu [9]. Efekt ten jest spowodowany naprężeniem wywołującym polaryzację piezoelektryczną i silne wewnętrzne pole elektryczne w warstwach półprzewodników silnie niedopasowanych sieciowo. Może on prowadzić do zmian profilu studni kwantowych i w konsekwencji do przesunięcia widma, tzw. kwantowy efekt Starka [9, 14].

Współcześnie tworzone są modele empiryczne próbujące modelować widmo emisji LED na podstawie parametrów takich jak: temperatura złącza, natężenie prądu, widmowa moc optyczna, długość fali maksymalnej emisji i szerokość widmowa [5]. Temperatura złącza bezpośrednio i pośrednio wpływa na: efektywność wewnętrzną, maksymalną moc, niezawodność, długość fali maksymalnej emisji (relacja Varhaniego) [9] oraz szerokość widmową [9]. Niestety jest prawie niemożliwe, aby wiarygodnie zmierzyć temperaturę złącza p-n LED – główny czynnik determinujący zmianę długości fali. Podejmowane są próby pomiaru metodami pośrednimi, napięcia lub przesunięcia długości fali dla maksymalnego natężenia [9].

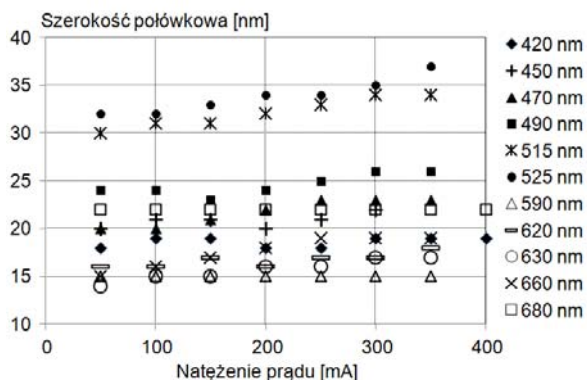
Dalsza część publikacji zawiera wyniki pomiarów parametrów LED [15] istotnych w projektowaniu układu zasilającego lampę LED-ową. Programowanie intensywności świecenia diod składowych można realizować poprzez pomiar i korekcję w czasie rzeczywistym irradycji spektralnej zestawu, albo poprzez pomiar temperatury obudowy i prądu diod oraz korekcję rozkładu i mocy wg znanych zależności temperatury i natężenia prądu. Druga metoda jest prostsza, chociaż nie uwzględnia efektu starzenia związanego ze spadkiem wydajności emisyjnej diod. Zatem na etapie projektowania układu zasilającego, ważną informacją jest wpływ wartości natężenia prądu zasilającego na przesunięcie długości fali maksymalnej emisji. Zmiany długości fali maksymalnej emisji wraz ze zmianą natężenia stałego prądu zasilającego są niewielkie. Wraz ze wzrostem natężenia prądu od zera do wartości maksymalnej danej diody następuje przesunięcie maksimum emisji do 8 nm w stronę fal krótszych dla diod z zakresu od 420 nm do 525 nm. W przypadku diod emitujących fale w zakresie od 590 nm do 680 nm następuje około 5 nm przesunięcie w stronę fal dłuższych (Tab.1).

Tabela 1. Zależność długości fali maksymalnej emisji diod monochromatycznych od natężenia prądu zasilającego

I [mA]	Długość fali maksymalnej emisji [nm]											
	420	450	470	490	515	525	590	620	630	660	680	
50	421	460	470	498	525	528	593	619	630	665	683	
100	420	459	470	496	523	526	594	620	630	665	684	
150	420	458	469	495	521	525	594	620	630	665	684	
200	420	456	469	495	520	524	594	620	630	666	684	
250	420	456	468	494	519	523	594	621	631	667	685	
300	419	455	467	494	518	523	595	621	631	668	685	
350	419	455	467	494	517	523	595	623	631	669	685	
400	419										685	
500	418										686	
600											688	

Równie ważną informacją, jak stabilność położenia charakterystyki emisyjnej, jest znajomość zależności widmowych pasm emisyjnych (połwkowej szerokości widma - FWHM) diod składowych od natężeń prądów zasilających. Z otrzymanych wyników pomiarów (Rys.7) wynika, że taka zależność występuje, chociaż w niewielkim zakresie wartości - rzędu pojedynczych nanometrów. Znacznie mniej korzystne wnioski wynikają z porównania tej zależności dla różnych rodzajów diod monochromatycznych

- FWHM wzrasta (bądź jest niezmienna) wraz ze wzrostem natężenia prądu. Oznacza to, iż tendencji nie można uogólnić i wrażliwość zmiany tego parametru należy dla każdej diody rozpatrywać oddzielnie. Powyższa właściwość powoduje określone konsekwencje projektowe – parametry każdej diod składowych oświetlacza ledowego należy przemierzyć indywidualnie i rozważyć wpływ niestabilności FWHM na przebieg wypadkowej charakterystyki widmowej lampy. Podobny problem występuje w czasie eksploatacji oświetlacza, gdy uszkodzoną diodę należy zastąpić identycznym elementem.



Rys. 7. Wpływ zmiany natężenia prądu zasilania monochromatycznej LED na szerokość połówkową widma emisji

W podobny sposób zachowują się (Tab.2), zmiany współrzędnych kolorymetrycznych w funkcji zmian prądu zasilającego. Dla analizowanego zestawu LED, w zakresie zalecanych przez producenta zmian wartości prądu zasilania, zmiany współrzędnych kolorymetrycznych  $x$  i  $y$  miały zarówno wartość dodatnią jak też ujemną w przypadku współrzędnej  $x$ , natomiast wartość  $y$  zwykle ulegała zmniejszeniu przy wzroście natężenia prądu (z wyjątkiem diody 660 nm). W przeważającej większości przypadków zmiana współrzędnych kolorymetrycznych była zauważalna na drugim miejscu po przecinku.

Tabela 2. Maksymalne zmiany współrzędnych kolorymetrycznych analizowanego zestawu diod

Symbol LED	Długość fali [nm]	Moc opt. [mW]	$\Delta x$	$\Delta y$
SMB1N-420H	420	420	+0,0005	0,0000
SMB1N-D450	450	480	+0,0052	-0,0081
SMB1N-D470	470	470	+0,0091	-0,0219
SMB1N-490	490	200	+0,0046	-0,1065
SMB1N-515V	515	250	-0,0475	-0,0150
SMB1N-525V	525	250	-0,0279	-0,0102
SMB1N-590	590	200	+0,0087	-0,0086
SMB1N-620	620	190	+0,0049	-0,0048
SMB1N-D630	630	330	-0,0036	-0,0014
SMB1N-D660N	660	290	-0,0001	+0,0002
SMB1N-680	680	170	+0,0007	-0,0005
H2A3-NW	biała LED 3300 K	<b>160 lm</b>	-0,0102	-0,0026
H2A3-WW	biała LED 6000 K	<b>160 lm</b>	-0,0098	-0,0220

## Wnioski

Zależność wpływu sposobu zasilania na wybrane parametry optyczne lamp ledowych jest zależnością wzajemną. Z jednej strony sposób zasilania, stałoprądowy lub impulsowy, pozwala zrealizować określone charakterystyki lub efekty optyczne - z drugiej strony zmienność parametrów elementów składowych lampy wymusza określone podejście konstrukcyjne do układu zasilającego. Efektywne wykorzystanie możliwości optycznych LED wymaga indywidualnego podejścia do

każdego elementu, w tym dokonania dokładnych pomiarów i analizy wpływu wrażliwości parametrów na efekt końcowy. Niestety użytkownicy oświetlenia zbyt małą wagę przywiązują do wpływu sposobu zasilania na jakość uzyskiwanego światła.

Publikację opracowano na podstawie wyników III etapu programu wieloletniego "Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy", finansowanego w latach 2014-2016 w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych ze środków MNiSW/NCBiR - PW/BWP/WE/1/2014

Koordinator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy - Państwowy Instytut Badawczy  
Wykonawca projektu: Politechnika Białostocka

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

dr inż. Marian Gilewski, Politechnika Białostocka, Katedra Automatyki i Elektroniki, Białystok, ul. Wiejska 45D, e-mail: [m.gilewski@pb.edu.pl](mailto:m.gilewski@pb.edu.pl)

dr inż. Łukasz Gryko, Politechnika Białostocka, Katedra Elektroenergetyki, Fotoniki i Techniki Świetlnej, Białystok, ul. Wiejska 45D, e-mail: [l.gryko@pb.edu.pl](mailto:l.gryko@pb.edu.pl)

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

## LITERATURA

- [1] Kalinowski J., Organic Light-Emitting Diodes: Principles, Characteristics & Processes, CRC Press, 2004
- [2] Harrison L.T., Current Sources & Voltage References, Elsevier, USA, 2005
- [3] Silicon Touch Technology Inc.: DD311 High Constant Current LED Driver, Taiwan, 2008.
- [4] Hamamatsu Photonics, Guide to Streak camera, Japan, 2010
- [5] 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
- [6] Schubert E. F., Gessmann T., Kim J. K., Light emitting diodes. John Wiley & Sons, Inc., 2005
- [7] Oleksy M., Kraśniewski J., Janke W., Wpływ temperatury na charakterystyki optyczne i elektryczne diod LED mocy, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2014), nr 9, 83-85
- [8] Bouchard S., Thibault S., Désaulniers P., Dallaire X., Optical and electrical variations in high-power white light-emitting diodes stressed with typical operation conditions, *Journal of Photonics for Energy*, 2 (2012), nr 1, 026502-1
- [9] Chhaged 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
- [10] Chen H., Hui S. Y., Dynamic prediction of correlated color temperature and color rendering index of phosphor-coated white light-emitting diodes, *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 61 (2014), nr 2, 784-797
- [11] Gu Y., Narendran N., Dong T., Wu H., Spectral and luminous efficacy change of high-power LEDs under different dimming methods, *Proc. SPIE*, 6337 (2006), 63370J-63370J
- [12] Chhaged S., Xi Y., Li Y. L., Gessmann T., Schubert E. F., Influence of junction temperature on chromaticity and color-rendering properties of trichromatic white-light sources based on light-emitting diodes, *Journal of Applied Physics*, 97 (2005), nr 5, 054506
- [13] Peng D., Jin K., The influence of driving current on emission spectra of GaN-based LED, *In: Electronics and Optoelectronics (ICEOE), IEEE*, 2 (2011), 148-151
- [14] Rudziński M., Wesołowski M., Strupiński W., Niebieskie, zielone i białe emitory światła wytwarzane z półprzewodników AlIn-BN, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2014), nr 7, 1-13
- [15] Borbély Á., Schanda J., Colour matching using LEDs as primaries, *Color Research & Application*, 29 (2014), nr 5, 360-4