

Model detekcji promieniowania w układzie dioda LED – przetwornik CCD

Streszczenie. W niniejszej pracy przedstawiono pomiarowy model detekcji promieniowania emitowanego przez diody elektroluminescencyjne za pomocą kamery CCD. Omówiono w niej założenia i cele modelowania oraz budowę stanowiska pomiarowego. Zaprezentowano również wyniki eksperymentalnej weryfikacji proponowanego modelu oraz ocenę niepewności przeprowadzonych pomiarów.

Abstract. In this work the measuring model of detection of radiation emitted by electroluminescence diodes with a CCD camera was presented. The modeling assumptions and goals, as well as a structure of measuring stand were described. The results of experimental verification of the proposed model and evaluation of measurement uncertainty were given. (**Model of radiation detection in a system: LED – CCD matrix**).

Słowa kluczowe: dioda LED, kamera CCD, natężenie promieniowania, luksonierz.

Keywords: LED, CCD matrix, radiation intensity, light meter.

Wstęp

W pomiarach optycznych parametrów źródeł światła stosuje się dwie metody: fotometryczną i radiometryczną. Obie mają swoje zalety, ale też i ograniczenia. Przy użyciu metody fotometrycznej można szybko otrzymać informacje m.in. o natężeniu oświetlenia, światłości czy luminancji, lecz czułość spektralna używanych do tego przyrządów nie zawsze jest dopasowana do badanego źródła światła (jak w przypadku diod LED emitujących promieniowanie o barwie białej lub niebieskiej). Natomiast metoda radiometryczna pozwala uzyskać pełną informację o krzywej spektralnej badanego źródła światła, lecz kosztem szybkości i dynamiki pomiaru. Zaprezentowany poniżej model detekcji promieniowania emitowanego przez diody LED umożliwia szybkie i stosunkowo proste pomiary wartości natężenia promieniowania, przy zachowaniu właściwości dynamicznych i pozwalając zmniejszyć błąd niedopasowania krzywej czułości spektralnej detektora i widma badanej diody.

Założenia modelu

Przy projektowaniu pomiarowego modelu detekcji promieniowania w układzie: dioda LED – przetwornik CCD przyjęto założenie o następującej treści:

Istnieje zależność między liczbą ładunków elektrycznych zgromadzonych przez elementy aktywne matrycy CCD a liczbą fotonów padających na te elementy, a więc istnieje również zależność między liczbą tych ładunków elektrycznych a natężeniem promieniowania widzialnego emitowanego przez badane źródło światła.

Założenie to sformułowano na podstawie analizy danych literaturowych oraz serii obserwacji zmian w obrazach świecących diod LED zarejestrowanych kamerą CCD, które emitowały promieniowanie o różnym natężeniu [1].

Jako główne cele modelowania przyjęto:

- opracowanie szybkiego i stosunkowo prostego sposobu rejestracji i przekształcania obrazów otrzymanych przy użyciu kamery CCD;
- określenie zależności między natężeniem promieniowania I_{LED} emitowanego przez diody LED a średnią jaskrawością N_{sr} uzyskaną z przekształcania obrazu zarejestrowanego kamerą CCD;
- uzyskanie przydatnych w praktyce informacji o natężeniu i jednorodności promieniowania widzialnego emitowanego przez diody elektroluminescencyjne z obrazów zarejestrowanych kamerą CCD.

Podczas rejestracji w większości kamer CCD zachodzi nieliniowe przekształcanie (tzw. mapowanie) wyjściowego sygnału cyfrowego zanim zostanie on zapisany w pamięci i

przedstawiony w formie obrazu. Nieliniowa odpowiedź detektora może wpłynąć na poprawność wyników, jeśli nie zostanie uwzględniona w obróbce końcowych wartości uzyskanych z obrazów [2]. Na każdym etapie pomiaru, wraz z przekształcaniami jakim poddawany jest pierwotny sygnał wysyłany przez diodę LED, zmieniają się również wartości wielkości fizycznych opisujących sygnał oraz pojawiają się błędy i zniekształcenia wynikające z zasady działania kolejnych elementów układu lub z procesów obróbki [2,3].

Po załączeniu układu zasilania w torze pomiarowym zachodzi kolejno:

- 1) zamiana części energii elektrycznej na promieniowanie optyczne o określonej mocy P ,
- 2) przejście promieniowania przez tor optyczny,
- 3) przejście promieniowania o określonym natężeniu napromienienia E_p przez przesłonę,
- 4) padanie promieniowania o określonej wartości ekspozycji X na elementy aktywne matrycy CCD,
- 5) zamiana części energii promieniowania optycznego na sygnał elektryczny,
- 6) gromadzenie i transport ładunku elektrycznego do rejestrów,
- 7) zliczanie zgromadzonego ładunku (N_E – liczba zgromadzonych ładunków elektrycznych),
- 8) przejście zgromadzonego ładunku przez układy wzmacniania sygnału,
- 9) otrzymanie wartości analogowych napięcia U_A ,
- 10) zamiana wartości analogowych napięcia U_A na odpowiadające im wartości cyfrowe U_D w układach elektronicznych kamery,
- 11) transformacja wartości cyfrowych U_D na wartości cyfrowe Z w układzie przetwarzania,
- 12) tworzenie obrazu na podstawie danych zawartych w końcowych wartościach cyfrowych Z ,
- 13) uzyskanie z obrazu (i jego histogramu) informacji o poziomie natężenia jasności poszczególnych pikseli n ,
- 14) otrzymanie w procesie progowania histogramu bezwymiarowej wielkości N_{sr} , której wartość opisuje średni poziom jasności części obrazu związanej z promieniowaniem emitowanym przez diodę LED.

Promieniowanie emitowane przez diodę LED jest widoczne na obrazie z kamery CCD jako grupa pikseli jaśniejszych od otoczenia (tła). Zmiany wielkości obszaru, jaki zajmują te piksele oraz zmiany ich poziomu jasności są proporcjonalne do zmian natężenia rejestrowanego promieniowania [1]. Bezwymiarowa wielkość N_{sr} w sposób wymierny określa poziom jasności pikseli reprezentujących na obrazie emitowane przez diody LED promieniowanie, a

jej wartość liczbową jest proporcjonalna do natężenia promieniowania wysyłanego przez diodę LED. Równanie przetwarzania opisujące tę zależność ma ogólną postać:

$$(1) \quad I_{LED} = f_k(N_{sr})$$

gdzie: I_{LED} - natężenie promieniowania emitowanego przez diodę LED w zakresie widzialnym, N_{sr} - miara odpowiedzi kamery CCD na sygnał wysyłany przez diodę LED. I_{LED} jest wyrażona w kandelach, wielkość N_{sr} jest bezwymiarowa a jej wartość zawiera się w przedziale od 0 do 255.

Kolejne przekształcenia wielkości charakteryzujących promieniowanie zachodzą wewnątrz kamery lub układu optycznego, dlatego nie są znane ich wartości. Jedynie wartości wielkości wejściowych (prądu i napięcia) oraz wielkości wyjściowej N_{sr} można zmierzyć. Jednak ze względu na bezwymiarowość wielkości N_{sr} nie można jej bezpośrednio przeliczyć na wielkości radiometryczne (moc promieniowania Φ_E , natężenie napromienienia E_E) lub fotometryczne (natężenie oświetlenia E_v , światłość I_v). Nieznana jest również zależność ilościowa między N_{sr} a pozostalymi wymienionymi wielkościami. Dlatego, aby otrzymać wartości parametrów optycznych diody LED badanej przy użyciu kamery CCD należy przeprowadzić pomiary porównawcze, czyli wykonać pomiary dwoma rodzajami przyrządów przy zachowaniu tych samych wartości wielkości wejściowych i warunków pomiaru, określonych w normach dla diod LED. Po przeprowadzeniu serii pomiarów wielkości fotometrycznej (natężenia oświetlenia) za pomocą luksomierza oraz kamerą CCD wielkości bezwymiarowej (średniej jaskrawości) można na podstawie uzyskanych w ten sposób wyników wyprowadzić zależność wiążącą wielkość N_{sr} z wielkością fotometryczną używaną do opisu promieniowania emitowanego przez źródła światła takie jak diody LED (np. z natężeniem oświetlenia E_v w przypadku porównania z wynikami uzyskanymi przy użyciu luksomierza). Dzięki temu otrzymuje się wynik pomiaru w jednostkach fotometrycznych, co pozwala na porównanie jego wartości z wynikami uzyskanymi w pomiarach innymi przyrządami i w innych warunkach.

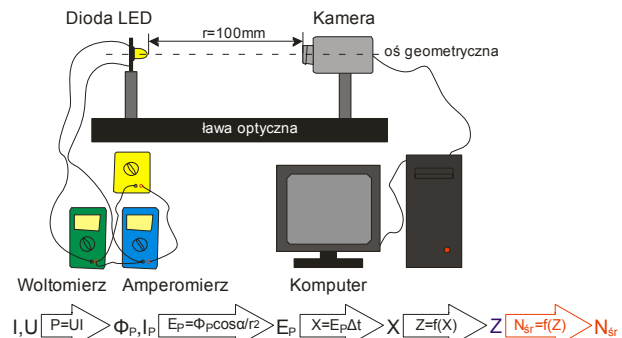
Stanowisko pomiarowe

Wartość średniej jaskrawości N_{sr} uzyskana w wyniku obróbki obrazu zależy od wartości sygnału emitowanego przez diodę LED, jednak ilościowa zależność między średnią jaskrawością a natężeniem promieniowania nie jest znana. W celu znalezienia równania opisującego zależność między światłością I_v charakteryzującą promieniowanie emitowane przez diodę LED a wielkością N_{sr} otrzymaną z obrazu, przeprowadzono dwa rodzaje pomiarów pośrednich natężenia promieniowania: przy użyciu kamery CCD oraz za pomocą luksomierza. W obu przypadkach zachowano warunki B według CIE (odległość między oprawą diody LED a detektorem równa 100 mm, powierzchnia detektora prostopadła do osi geometrycznej diody, osie geometryczne detektora i diody pokrywają się) oraz zastosowano przesłony w celu odizolowania układu od wpływu innych niż badane źródła światła będących w otoczeniu. W pomiarach wykorzystano następujące przyrządy: luksomierz L-100 z głowicą pomiarową GL-100, kamerą CCD Sony DFW-X710 oraz multimetry: BRYMEN BM859CF i Metex 4660A.

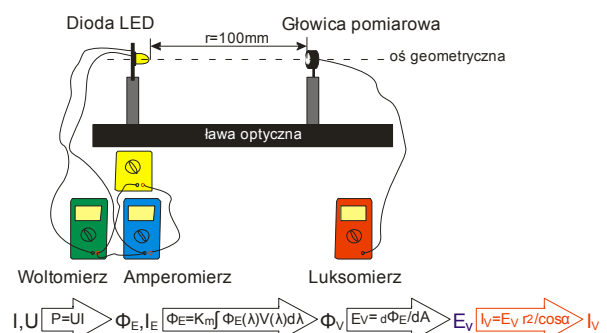
Wymienione przyrządy pomiarowe wybrano ze względu na ich dostępność i powszechne stosowanie w pomiarach elektrycznych i fotometrycznych, mając na celu wykazanie ile wystarczająco wiarygodnych informacji można uzyskać przy użyciu takich narzędzi pomiarowych.

Na rysunkach 2 i 3 pokazano budowę stanowiska pomiarowego do rejestracji promieniowania emitowanego

przez diodę LED za pomocą: kamery CCD i luksomierza oraz schematycznie zilustrowano przekształcenia, jakim podlega sygnał w torze pomiarowym z uwzględnieniem wielkości otrzymanych w wyniku przekształceń (N_{sr} , I_v) i wielkości wyjściowych (Z , E_v).



Rys. 1. Budowa stanowiska pomiarowego oraz proces przekształcania sygnału z diody LED w torze pomiarowym do rejestracji kamerą CCD



Rys. 2. Budowa stanowiska pomiarowego oraz proces przekształcania sygnału z diody LED w torze pomiarowym do pomiaru luksomierzem

Dla obu rodzajów przeprowadzonych pomiarów sygnał wejściowy, czyli promieniowanie emitowane przez diodę LED, jest jednakowy, natomiast z powodu transformacji jakim podlega ten sygnał w trakcie pomiaru otrzymuje się różne wielkości końcowe: fotometryczne (dla luksomierza) oraz bezwymiarowe (w przypadku kamery CCD).

Uzyskane z pomiarów luksomierzem średnie wartości natężenia oświetlenia E_v przeliczono na wartości światłości I_v zgodnie ze wzorem [4]:

$$(2) \quad I_v = \frac{E_v \cdot r^2}{\cos \alpha}$$

gdzie: r - odległość badanej diody LED od detektora, α - kąt między osią diody LED a kierunkiem detekcji.

W pomiarach fotometrycznych można traktować diodę LED jako punktowe źródło światła, jeśli spełnione są warunki dalekiego pola [5-6]. W przypadku ich spełnienia oraz zachowania warunków B zgodnie z zaleceniami CIE równanie (2) przyjmuje postać:

$$(3) \quad I_v = E_v \cdot r^2$$

Przebieg pomiarów

Pomiary przeprowadzono dla sześciu rodzajów diod LED emitujących promieniowanie o barwie: białej (LL-504WC-W2-3QD), ciepłej białej (OSM5DL5111A-VW, S300TWW4G-S-2800K), czerwonej (OS5RPM5A31A-QR), zielonej (OSPG5131A-ST) i niebieskiej (OSUB5131A-PQ).

Pomiary natężenia oświetlenia E_v wykonane przy użyciu luksomierza i rejestrację średniej jaskrawości N_{sr} za pomocą

kamery CCD przeprowadzono dla czterech wartości prądu zasilania diody: 5 mA, 10 mA, 15 mA i 20 mA. Przed każdym kolejnym pomiarem wartość odległości $r = 100$ mm oraz wartość kąta $\alpha = 0^\circ$ nastawiano na nowo w celu sprawdzenia całkowitego rozrzutu wyników. Dla diod LED zielonej i niebieskiej przeprowadzono dodatkowe pomiary przy odległości $r = 316$ mm ze względu na duże wartości N_{sr} bliskie nasyceniu (bliskie maksymalnej wartości N_{sr} równej 254). Na każdą serię pomiarową składało się 31 pomiarów.

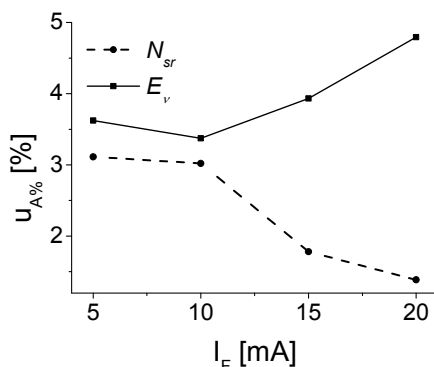
Niepewności pomiarowe dla natężenia oświetlenia E_v , średniej jaskrawości N_{sr} i światłości I_v , obliczono zgodnie ze standardami i wytycznymi dotyczącymi pomiarów rekomendowanymi przez międzynarodowe organizacje metrologiczne. Uwzględniono zarówno rozrzut wyników, jak i niedokładność aparatury [7-8].

Wielkości otrzymane z pomiarów luksomierzem i z rejestracji kamerą CCD są wyrażone w różnych jednostkach oraz przyjmują wartości z różnych przedziałów liczbowych: od 0 do 255 dla N_{sr} i od 0,001 lx do 3 klx dla E_v . Dlatego w celu porównania rozrzutu wyników obu wielkości zastosowano procentową względną wartość niepewności standardowej typu A, obliczoną odpowiednio ze wzorów:

$$(4) \quad u_{A\%} = \frac{u_A}{E_v} \cdot 100\%$$

$$(5) \quad u_{A\%} = \frac{u_A}{N_{sr}} \cdot 100\%$$

Wartość $u_{A\%}$ jest mniejsza dla pomiarów wykonanych luksomierzem. Dla wyników uzyskanych kamerą CCD niepewność $u_{A\%}$ przyjmuje wartości z przedziału (0,001 – 0,3) % – oprócz dwóch przypadków, gdy przyjmuje wartości wyższe od 1,5%, a dla wyników uzyskanych luksomierzem niepewność $u_{A\%}$ przyjmuje wartości z przedziału (0,02 – 0,31) %. Mniejszy zakres zmian wartości w przypadku pomiarów luksomierzem oznacza, że pomiar luksomierzem jest bardziej stabilny, jednak różnica wartości $u_{A\%}$ jest nieznaczna. Natomiast w większości przypadków pomiaru luksomierzem procentowa wartość niepewności $u_{A\%}$ rośnie wraz ze wzrostem wartości prądu zasilającego diodę LED, a dla wyników zarejestrowanych kamerą CCD obserwuje się tendencję przeciwną (rys. 3).
CCD

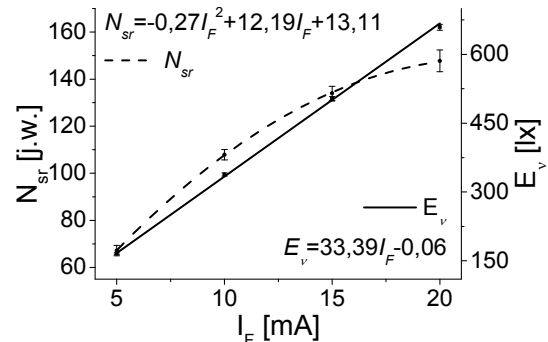


Rys. 3. Względna niepewność standardowa $u_{A\%}$ w funkcji prądu zasilania diody LED przy $r = 100$ mm dla diody białej

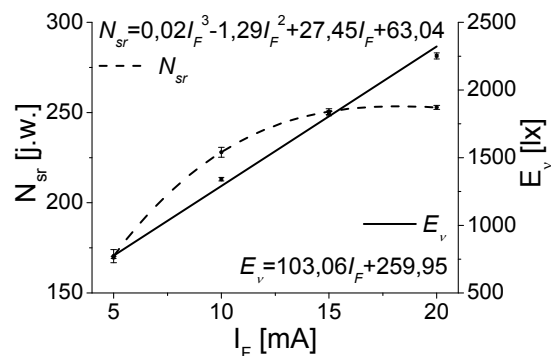
Dla wszystkich badanych diod LED wartość natężenia oświetlenia E_v zależy liniowo od prądu zasilania I_F , natomiast wartość średniej jaskrawości N_{sr} zmienia się zgodnie z funkcją wielomianową: drugiego stopnia dla diod białych i czerwonej (rys. 4) oraz trzeciego stopnia dla diod zielonej i niebieskiej (rys. 5).

Zależność wielomianowa wynika ze specyfiki kamery CCD – przy dużych wartościach prądu I_F (dużej ilości

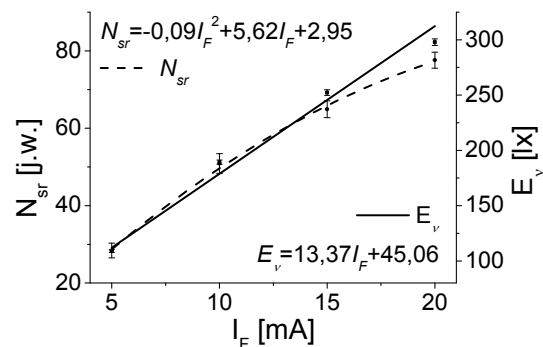
promieniowania emitowanego przez diodę LED), w otrzymanym obrazie pojawia się efekt nasycenia, który wpływa na wartość średniej jaskrawości. Widoczne jest to zwłaszcza w charakterystykach $N_{sr} = f(I_F)$ diod zielonej i niebieskiej. Dlatego dla tych diod przeprowadzono również rejestracje i pomiary przy większej odległości $r = 316$ mm, w wyniku których uzyskano zależność wielomianową drugiego stopnia tak, jak dla pozostałych diod LED (rys. 6).



Rys. 4. Średnia jaskrawość N_{sr} i natężenie oświetlenia E_v w funkcji prądu zasilania I_F przy $r = 100$ mm dla diody czerwonej



Rys. 5. Średnia jaskrawość N_{sr} i natężenie oświetlenia E_v w funkcji prądu zasilania I_F przy $r = 100$ mm dla diody zielonej



Rys. 6. Średnia jaskrawość N_{sr} i natężenie oświetlenia E_v w funkcji prądu zasilania I_F przy $r = 316$ mm dla diody zielonej

Równanie przetwarzania

Ze względu na odmienne funkcje opisujące zależności $E_v = f(I_F)$ i $N_{sr} = f(I_F)$, odległość na wykresie między wartościami E_v i N_{sr} zwiększa się wraz ze wzrostem wartości prądu I_F , a więc ze wzrostem wartości natężenia promieniowania emitowanego przez diodę LED. Znalezienie funkcji opisującej zmianę wartości różnicy między E_v i N_{sr} umożliwi obliczenie wartości natężenia promieniowania I_{LED} na podstawie wartości N_{sr} . Na rysunku 7 pokazano wzajemną zależność wartości natężenia oświetlenia E_v i wartości średniej jaskrawości N_{sr} dla diody białej. Jak widać, dopasowanie krzywej do wartości E_v i N_{sr} jest lepsze dla

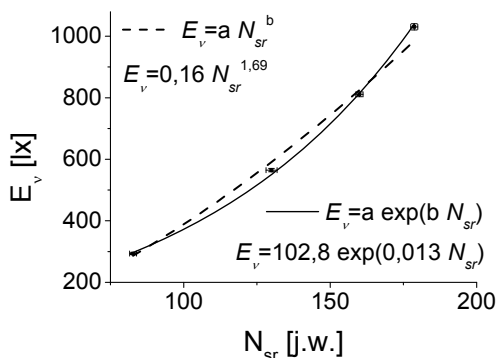
funkcji eksponencjalnej niż dla funkcji potęgowej o podstawie N_{sr} . Tego typu dopasowania wykonano dla wszystkich badanych diod LED i w każdym przypadku największą dokładność otrzymano dla funkcji eksponencjalnej, stąd równanie przetwarzania (1) dla wszystkich badanych diod przyjmuje postać:

$$(6) \quad I_{LED} = k_1 \cdot e^{k_2 N_{sr}}$$

gdzie: k_1, k_2 - stałe funkcji $f_k(x) = k_1 \cdot \exp(k_2 \cdot x)$.

W tabeli 1 zestawiono wartości stałych k_1 i k_2 funkcji $f_k(x) = k_1 \cdot \exp(k_2 \cdot x)$ dobranych dla poszczególnych diod LED, a w tab. 2 zestawiono wartości I_v , I_{LED} i ich niepewności pomiarowe dla wybranych badanych diod LED. Wartości I_v otrzymano z przeliczenia wartości E_v zgodnie ze wzorem (3), wartości I_{LED} z przeliczenia wartości N_{sr} zgodnie ze wzorem (6) a wartości ΔI_{LED} korzystając ze wzoru:

$$(7) \quad \Delta I_{LED} = k_2 \cdot N_{sr} \cdot |\Delta N_{sr}|$$



Rys. 7. Natężenie oświetlenia E_v w funkcji średniej jaskrawości N_{sr} przy $r = 100$ mm dla diody białej

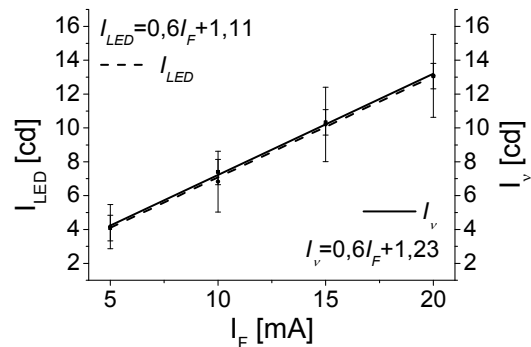
Po zastosowaniu wyrażenia (6) uzyskano liniowe zależności I_{LED} w funkcji prądu I_F dla wszystkich badanych diod LED (przy $r = 100$ mm dla diod białych i diody czerwonej, a przy $r = 316$ mm dla diody zielonej i niebieskiej). Z porównania charakterystyk natężenia promieniowania dla luksomierza i kamery CCD widać, że obie funkcje opisujące zależności: $I_v = f(I_F)$ i $I_{LED} = f(I_F)$ mają bardzo zbliżony przebieg, a różnica w nachyleniu obu funkcji nie przekracza 4% ich wartości (rys. 8–9).

Tabela 1. Zestawienie wartości stałych k_1 i k_2 funkcji $f_k(x) = k_1 \cdot \exp(k_2 \cdot x)$ opisującej zależność między średnią jaskrawością a natężeniem promieniowania dla badanych diod LED

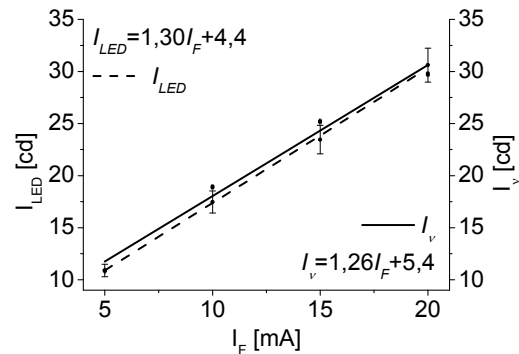
Dioda LED	r [mm]	k_1	k_2	Funkcja f_k
LL-504WC-W2-3QD	100	1,01	0,013	$1,01 \cdot \exp(0,013x)$
OSM5DL5111A-VW	100	1,13	0,016	$1,13 \cdot \exp(0,014x)$
S300TWW4G-S-2800K	100	1,04	0,020	$1,04 \cdot \exp(0,02x)$
OS5RPM5A31A-QR	100	0,54	0,017	$0,54 \cdot \exp(0,017x)$
OSPG5131A-ST	316	6,00	0,021	$6 \cdot \exp(0,21x)$
OSUB5131A-PQ	316	1,90	0,012	$1,9 \cdot \exp(0,012x)$

Tabela 2. Wartości wielkości I_v i I_{LED} otrzymane w pomiarach oraz ich niepewności dla wybranych diod LED

Dioda LED	I_F [mA]	Wynik pomiaru $I_v = I_v \pm u_r$ [cd]	Wynik pomiaru $I_{LED} = I_{LED} \pm \Delta I_{LED}$ [cd]
S300TWW4G-S-2800K - dioda ciepła biała	5	$2,4 \pm 0,8$	$2,4 \pm 0,9$
	10	$4,4 \pm 0,8$	$4,3 \pm 1,4$
	15	$6,2 \pm 0,8$	6 ± 2
	20	$7,8 \pm 0,8$	$7,8 \pm 2,1$
OSPG5131A-ST - dioda zielona	5	$10,9 \pm 0,8$	$10,9 \pm 0,6$
	10	$18,9 \pm 0,8$	$17,5 \pm 1,1$
	15	$25,2 \pm 0,8$	$23,4 \pm 1,4$
	20	$29,7 \pm 0,8$	31 ± 2



Rys. 8. Porównanie zależności I_v i I_{LED} w funkcji prądu zasilania I_F diody LED przy $r = 100$ mm dla diody ciepłej białej



Rys. 9. Porównanie zależności I_v i I_{LED} w funkcji prądu zasilania I_F diody LED przy $r = 316$ mm dla diody zielonej

Podsumowanie

Przeprowadzona eksperymentalna weryfikacja zaprezentowanego modelu detekcji wykazała, że ten sposób pomiaru pozwala uzyskać informacje o wartości natężenia promieniowania diod LED emitujących promieniowanie, zarówno o barwie białej, jak i czerwonej, zielonej lub niebieskiej. Otrzymane z pośrednich pomiarów kamerą CDD charakterystyki zależności natężenia promieniowania w funkcji prądu zasilania diody są zbliżone z charakterystykami wykreślonymi na podstawie pomiarów luksomierzem.

Autorzy: dr inż. Joanna Parzych, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, Zakład Metrologii i Optoelektroniki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: joanna.parzych@put.poznan.pl.

LITERATURA

- [1] Fiorentin P., Iacomussi P., Rossi G., Characterization and calibration of a CCD detector for light engineering, *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 54 (2005), n.1, 171-177
- [2] Faraji H., MacLean W. J., CCD noise removal in digital images, *IEEE Trans. on Image Processing*, 15 (2006), 2676-2685
- [3] Chen J., Venkataraman K., Bakin D., Rodricks B., Gravelle R., Rao P., Ni Y., Digital camera imaging system simulation, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 56(2009), n. 11, 2496-2505
- [4] *Handbook of LED Metrology*, Instrument Systems GmbH, 2010
- [5] Nägele T., White LEDs – importance of accepted measurement standards, *LED professional Review*, 10(2008), 22-25
- [6] Young R., *Measuring light emission from LEDs*, Reprint (R35), Optronic Laboratories, 2006
- [7] JCGM 104:2009 Evaluation of measurement data - An introduction to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" and related documents, JCGM, 2009
- [8] Cysewska-Sobusiak A., *Podstawy metrologii i inżynierii pomiarowej*, Poznań, Wyd. Politechniki Poznańskiej 2010