

KOMITET METROLOGII I APARATURY NAUKOWEJ
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

PROBLEMY METROLOGII ELEKTRONICZNEJ I FOTONICZNEJ

9

Praca zbiorowa
pod redakcją Janusza Mroczi



20lat

**Katedry Metrologii
Elektronicznej
i Fotonicznej**

Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej

PROBLEMY METROLOGII
ELEKTRONICZNEJ I FOTONICZNEJ

KOMITET METROLOGII I APARATURY NAUKOWEJ
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

**PROBLEMY METROLOGII
ELEKTRONICZNEJ
I FOTONICZNEJ**
9

*Praca zbiorowa
pod redakcją Janusza Mroczki*



Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej
Wrocław 2018

Opracowanie redakcyjne i korekta
Hanna JUREK

Projekt okładki
Janusz MROCZKA

Wszelkie prawa zastrzeżone. Żadna część niniejszej książki, zarówno w całości, jak i we fragmentach, nie może być reprodukowana w sposób elektroniczny, fotograficzny i inny bez zgody wydawcy i właścicieli praw autorskich.

© Copyright by Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2018

OFICYNA WYDAWNICZA POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
<http://www.oficyna.pwr.edu.pl>
e-mail: oficwyd@pwr.edu.pl
zamawianie.ksiazek@pwr.edu.pl

ISBN 978-83-7493-029-1

Druk i oprawa: beta-druk, www.betadruk.pl

SPIS RZECZY

Przedmowa	7
Cele i zadania Katedry Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej Politechniki Wrocławskiej	11
Misja Katedry	17
Agnieszka IWAN, Adam JANUSZKO, Stanisław MALECZEK, Janusz MROCZKA, Organiczne oraz elastyczne ogniwa fotowoltaiczne – rzeczywistość i perspektywy	19
Dariusz SAWICKI, Agnieszka WOLSKA, Wybrane problemy oceny oślnienia	67
Marek LIPIŃSKI, Charakterystyka ogniw słonecznych	131
Urszula BŁASZCZAK, Maciej ZAJKOWSKI, Andrzej ZAJĄC, Wybrane zagadnienia projektowania i oceny jakości urządzeń oświetleniowych ze źródłami półprzewodnikowymi	203

Dzięki eksperymentom myślowym duch uczonego wznosi się ponad świat rzeczywistych narzędzi pomiarowych; dopomagają mu one w tworzeniu hipotez i formułowaniu problemów, których zbadanie w drodze rzeczywistych eksperymentów daje mu wgląd w nowe prawidłowości, również takie, których nie można wykryć za pomocą bezpośrednich pomiarów.

Max Planck, *Wege zur Physik. Erkenntnis*,
Leipzig 1944, s. 267

PRZEDMOWA

Schemat procesu poznawczego obejmujący: obiekt poznawczy, metody, środki poznania oraz odbiorcę wyników poznania narodził się wraz z chwilą, kiedy człowiek własny świat myślowy, stworzony w własnym umyśle, starał się zapisać w postaci uogólnionych hipotez, praw. Stąd też stał się on swego rodzaju „pewnikiem” obowiązującym do dzisiaj.

Dalsze poglądy na temat metod i środków poznania są już dyskusyjne. Na ogół przyjmuje się, że przejście od obiektu do obrazu może odbywać się dwoma sposobami oraz że wybór jednego z nich w danych okolicznościach jest związany ze sposobem powstawania obrazu i celem, któremu obraz ten ma służyć. Przez obserwację dostarczającą wiadomości jakościowych o zjawiskach za pośrednictwem zmysłów uzyskuje się obraz naturalny, stanowiący podstawę wiedzy potocznej, którą posługujemy się w codziennym życiu. Natomiast wyniki pomiarów wykonywanych z zastosowaniem przyrządów umożliwiają zbudowanie modelu stanowiącego naukowy obraz świata – wprawdzie ilościowy, ale równocześnie znacznie uproszczony względem rzeczywistości. Każdy z tych obrazów ma swoje specyficzne właściwości oraz swoiste zalety i wady przy jego użyciu jako tworzywa procesu poznawczego. Analizę porównawczą obu obrazów wykonuje się w ramach filozofii.

W Polsce porównanie takie zawiera rozprawa *Droga do filozofii* profesora Tatar-kiewicza. Według tego opracowania obraz naturalny, uzyskiwany na drodze codziennego doświadczenia, przedstawiający świat jako zespół rzeczy, buduje się:

- z wrażeń zmysłowych,
- z wyobrażeń bądź przechowywanych w pamięci, bądź też zrodzonych w wyobraźni,

- z doświadczeń wewnętrznych,
- z myśli i sądów.

Taki obraz wykazuje braki z powodu:

- swej niezupełności powstającej na skutek ograniczeń spowodowanych niedoskonałością zmysłów,
- względnosci i zmienności od chwili do chwili i od obserwatora do obserwatora,
- opisu w języku naturalnym, niepozwalającym na ściśle jednoznaczne sprecyzowanie pojęć i zastosowanie środków matematyki.

Jak już wspomniano, obraz naturalny ma charakter jakościowy, natomiast obraz naukowy ujmuje świat ilościowo, jako zespół procesów. Tworzy się go przez:

- rozszerzenie wiedzy potocznej,
- sprawdzenie i korygowanie jej przesłanek,
- dowodzenie tego, co było tylko domysłami,
- uściślanie przez mierzenie i liczenie,
- porządkowanie i systematyzowanie,
- ograniczenie przez pominięcie właściwości ocenianych tylko subiektywnie, nienadających się do ścisłego badania,
- opisanie językiem sztucznym, najczęściej liczbami i symbolami matematyki, umożliwiającymi dalsze przetwarzanie informacji.

Obraz naukowy zbudowany za pomocą takich metod wykazuje również braki, ponieważ:

- jest niezgodny z naszym codziennym doświadczeniem,
- jest zbudowany z bardzo uproszczonych modeli, które jedynie w takiej postaci można opisać środkami matematyki,
- w obrazie tym poszczególne rzeczy i procesy tracą swe indywidualności, zastępują je schematy-typy łączące w sobie tylko zasadnicze cechy grup przedmiotów i procesów.

Obrazy zbudowane na podstawie wiadomości dostarczanych przez codzienne doświadczenie wystarczają do zorganizowania bieżącego życia, z całą jego złożonością, od pracy do wrażeń estetycznych czy pojęć etyki. Obraz naukowy natomiast jest znacznie prostszy, uboższy w szczegółach i w zasięgu przedstawianych zjawisk, ograniczony praktycznie do zjawisk ujętych pojęciami fizyki dających się opisać symbolami matematyki. Opis ten umożliwia jednak wytłumaczenie istoty zjawisk i przybliżone przewidywanie ich przebiegów w przyszłości.

W przytoczonej systematyce mierzenie występuje zresztą razem z matematyką jedynie w czasie tworzenia naukowego obrazu świata i to tylko w jednym z postulatów. Wydaje się jednak, że bez przedstawienia ilościowego modelu zjawiska nie może mieć charakteru naukowego, wobec czego postulat mierzenia jest warunkiem podstawowym – *sine qua non* – naukowości co najmniej w naukach przyrodniczych. Wydaje mi się ponadto, że metodyka tworzenia obu rodzajów obrazów oraz zespół twierdzeń zasadniczych, na których jest ona oparta, są identyczne, zarówno w podejściu nauko-

wym, jak i posługującym się doświadczeniem życia codziennego. Zarówno pomiar, jak i obserwacja są bowiem oparte na porównaniu wielkości badanej z odpowiednim jej wzorcem i oszacowaniu granic obszaru, w którym zawarta jest prawdopodobnie wartość wielkości badanej. Różnica obu podejść leży przede wszystkim w charakterze wzorca, który w przypadku pomiarów jest wielkością fizyczną, niezależną od obserwatora, natomiast w czasie tworzenia obrazu naturalnego wzorcem jest jedno z poprzednich wrażeń obserwatora przechowywane w jego pamięci. Jest to więc wzorec psychologiczny, którego zachowanie podlega innym prawom niż w przypadku wzorca fizycznego. W następstwie tego inaczej szacuje się spodziewane granice, w których ma leżeć wielkość obserwowania. W pomiarach są to konkretne liczby, w obserwacji zadowolamy się szacunkiem większe/mniejsze/prawie równe. Konsekwencją różnicy wzorców jest również użycie przyrządów do porównywania ich wartości i wartości wielkości uzyskiwanych w pomiarach, natomiast posługiwanie się do tego celu jedynie zmysłami w bezpośrednich obserwacjach.

Zasadnicze ogniwa procesu poznawczego są w obu podejściach bardzo podobne i podlegają takim samym twierdzeniom. Natomiast konkretne obiekty, za pomocą których prowadzi się ten proces pochodzą po pierwsze z fizyki, po drugie z psychologii, co w konsekwencji prowadzi do uzyskiwanych obrazów jakościowych lub ilościowych. Dlatego wydaje się, że metrologia jest nie tylko samoistną dyscypliną naukową, ale i jedną z dyscyplin podstawowych, ponieważ bez jej udziału nie mogą się odbyć żadne badania doświadczalne, a w każdym razie nie mogą one osiągnąć rangi nauki.

Wszystkie przytoczone zagadnienia, poza stwierdzeniem, że istnieje świat materialny, którego obrazy tworzymy w naszej świadomości, są dyskusyjne. Przedyskutowaniu ich poświęcony jest cały wydawany cykl książek pt. *Wybrane zagadnienia metrologii elektronicznej i fotonicznej* ukazujący się każdego roku, a zapoczątkowany w dziesiątą rocznicę powołania Katedry Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej Politechniki Wrocławskiej. Oddając do rąk Czytelnika kolejny już tom redagowanego przeze mnie cyklu poświęconego metrologii, spodziewam się, że wyjaśni on, jaki jest i jaki powinien być jej stosunek do nauk z nią graniczących, przede wszystkim do informatyki, automatyki i cybernetyki, co może lub powinna z tych nauk zapożyczyć, a co dotychczas wytworzyła oryginalnego lub musi wytworzyć w przyszłości. Jestem przekonany, że chwila zadumy nad tym, co w naszym życiu ukazuje nam metrologia może wskazać i na pewno wskaże wiele innych, istotnych zagadnień, które należałoby rozwiązać.

Janusz Mroczka

CELE I ZADANIA KATEDRY METROLOGII ELEKTRONICZNEJ I FOTONICZNEJ POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ

Metrologia w procesie swojego ciągłego rozwoju odkrywa coraz nowsze zagadnienia poznawcze, ukazując tym samym nowe problemy pomiarowe do rozwiązania. To stymuluje rozwój doskonalszych narzędzi pomiarowych wykorzystujących osiągnięcia współczesnej nauki i technologii. Nowe problemy poznawcze i ich realne narzędzia poznania tworzą nowe kierunki metrologii. Oprócz tradycyjnych działów metrologii, takich jak: teoretyczne podstawy metrologii, wzorce, metody pomiarowe, obróbka danych pomiarowych, ocena niepewności pomiaru, technika systemów pomiarowych itp. pojawiają się działy nowe, a wśród nich: metrologia optyczna, metrologia fotoniczna, nanometrologia, metrologia bioniczna itp.

W procesie poznawczym metrologia posługuje się analizą i syntezą w dziedzinie abstrakcji na obszarach rzeczywistości wyrażonych przez modele fizyczne i matematyczne. To właśnie na tych modelach łatwo zauważamy przykłady formalnych analogii między zagadnieniami różnymi od strony zjawiskowej, a podobnymi od strony syntezy pojęciowej. Taki sposób myślenia stał się jedną z przyczyn powołania Katedry Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej na Politechnice Wrocławskiej, u podstaw działalności której leżą zagadnienia modelowania fizycznego rzeczywistych zjawisk dających się opisać za pomocą pojęć materii, energii (entropii) czasu i informacji (negentropii). Głównym celem pracy Katedry jest przekształcanie modeli fizycznych zbudowanych z pojęć materii, energii, czasu w modele matematyczne, a następnie w modele metrologiczne, które uzupełnione pojęciami informacji dostarczałyby wiadomości jakościowych i ilościowych. Podstawowy schemat działania Katedry odpowiada schematowi procesu poznawczego, stanowiącego szeregowie połączenie badanego obiektu, będącego celem poznania, z jego modelem fizycznym, matematycznym i metrologicznym, między którymi występują sprzężenia zwrotne stanowiące odzwierciedlenie procesów weryfikacyjnych poszczególnych modeli uwarunkowane zewnętrznymi kryteriami oceny.

Katedra Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej została powołana przez Senat Politechniki Wrocławskiej 27 stycznia 1998 r., a swoją działalność rozpoczęła 30 marca 1998 r.

Główne zadania Katedry to:

- kształcenie i rozwijanie zainteresowań metrologicznych wśród studentów i doktorantów poprzez prowadzenie i kierowanie specjalnością dydaktyczną „Aparatura elektroniczna” na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej,
- przygotowywanie pomocy dydaktycznych (skrypty, podręczniki, stanowiska laboratoryjne),
- inicjowanie i wykonywanie metrologicznych prac naukowych oraz współpraca z innymi uczelniami technicznymi i jednostkami PAN,
- współpraca z krajową służbą metrologiczną w zakresie wdrażania własnych osiągnięć naukowych, propagowanie osiągnięć innych ośrodków krajowych i zagranicznych oraz prognozowanie rozwoju metrologii i jej roli w różnych dziedzinach wytwórczości,
- podejmowanie współpracy z ośrodkami zagranicznymi w procesie kształcenia (wspólne doktoraty), prowadzenie wspólnych grantów (wspólne publikacje), inicjowanie wspólnych międzynarodowych konferencji.

Działalność naukowa Katedry obejmuje:

- metodologię obserwacji i eksperymentu,
- algorytmizację problemu odwrotnego,
- modelowanie matematyczne pól fizycznych i ich praktyczną realizację metodami tomografii optycznej i impedancyjnej,
- analizę spektralną i polaryzacyjną promieniowania rozproszonego w układach dyspersyjnych i ich praktyczne wykorzystanie w ocenie właściwości materiałów kompozytowych,
- metody obrazowania optycznego i przetwarzania danych pomiarowych w trójwymiarowej przestrzeni i ich fuzję celem bezstratnego kodowania obrazów,
- wieloczułnikową fuzję danych o różnej przestrzennej rozdzielczości z wykorzystaniem deterministycznych i stochastycznych metod ich przetwarzania w celu rekonstrukcji o wyższej jakości,
- wykorzystanie reprezentacji czasowo-częstotliwościowej do przetwarzania danych pomiarowych i ich praktyczną realizację za pomocą procesorów sygnałowych,
- metody identyfikacji parametrycznej i nieparametrycznej statycznych i dynamicznych modeli obiektów złożonych wraz z ich praktycznym zastosowaniem w pomiarach właściwości układu oddechowego i krwionośnego człowieka,
- wykorzystanie metod sztucznej inteligencji do pozyskiwania informacji ilościowych i jakościowych z danych pomiarowych,
- projektowanie, opracowywanie i optymalizację układów elektronicznych w systemach energii odnawialnej,
- projektowanie, opracowywanie i optymalizację komputerowych systemów pomiarowych i informacyjnych (w tym telemedycznych) do badań naukowych, monitorowania oraz procesów technologicznych,

- projektowanie i wykonywanie inteligentnych przyrządów pomiarowych z wykorzystaniem techniki mikroprocesorowej.

Katedra Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej zatrudnia 26 pracowników, w tym 21 nauczycieli akademickich i 1 doktoranta.

Katedra prowadzi współpracę z następującymi ośrodkami zagranicznymi:

- Institut National des Sciences Appliquees, Rouen, CNRS 6614 DS10, Francja,
- Department of Engineering and Product Design, University of Central Lancashire, Preston, Wielka Brytania,
- Institut Universitaire des Systemes Thermiques Industriels, Marsylia, UMR CNRS 6595, Francja,
- Department of Biomedical Engineering, Boston University, Boston, USA,
- Biomedical Physics Laboratory, Université Libre de Bruxelles, Belgia,
- Department of Medical Informatics, University of Szeged, Szeged, Węgry,
- Department of Electrical Engineering, Systems and Automation, Ghent University, Belgia,
- Dipartimento di Ingegneria Dell' Innovazione, University of Salento, Lecce, Włochy

oraz utrzymuje kontakty naukowe z następującymi ośrodkami naukowymi:

- Centre for Modelling and Information in Medicine, City University, London, UK,
- Dipartimento de Elettronica e Informatica, University of Padova, Padwa, Włochy,
- Royal Brompton National Heart and Lung Hospital, London, Wielka Brytania,
- Physiologie Respiratoire et Sportive, Hopital Charles Nicolle, Rouen, Francja,
- Auckland Bioengineering Institute, The University of Auckland, Nowa Zelandia.

Dorobek publikacyjny pracowników Katedry za ostatnie 10 lat obejmuje łącznie 491 prac naukowych, w tym: 11 książek, 105 publikacji w czasopismach zagranicznych z listy filadelfijskiej, 118 referatów na konferencjach zagranicznych, 46 artykułów w czasopismach krajowych, 120 referatów na konferencjach krajowych, 2 stypendia Fundacji na rzecz Nauki Polskiej (FNP). Zrealizowano 2 granty celowe KBN, 1 grant rozwojowy, 10 grantów indywidualnych KBN, 8 grantów promotorskich KBN, 3 granty NCN, 6 grantów międzynarodowych. Wydoktoryzowano 19 pracowników (4 we Francji z wyróżnieniem), 4 pracowników uzyskało stopnie doktora habilitowanego.

Te racjonalno-empiryczne poczynania, które prowadzimy wspólnie w Katedrze, służą nam do budowy przeświadczenia, że drogą kolejnych przybliżeń prawd cząstkowych przybliżamy się do tej nieosiągalnej prawdy absolutnej, którą skrywa przed nami Natura. W tym ciągłym dialogu z Naturą trwamy, doskonaląc siebie i swoich podopiecznych (studentów, doktorantów), a tym samym utwierdzamy się w przekonaniu, że droga ta nie doprowadzi nas do naukowego defetyzmu. Trwamy w przeświadczeniu, że zdobywane przez nas stopnie naukowe określają zakres naszych kompetencji w działaniu oraz naszą pozycję w procesie poznania. To one otwierają nam drzwi do społeczności, dla której nauka jest przywilejem i obowiązkiem. To one przypominają nam, że posiadliśmy zdolność postrzegania prawdy jako jednego ze źródeł naszej podmiotowości.

Jaki ma być epilog, wypowiedź końcowa przedstawiająca nasze dokonania. Mam świadomość, że nadejdzie czas nowy, a pokolenia, które przyjdą będą umiały sprostać nowym wyzwaniom. Mimo że byłem wychowany na utworach Młodej Polski i echem postromantycznych, to w swojej działalności zajmowałem krytyczną postawę wobec idealizmu racjonalistycznego, a wszelkim aprioryzmem przeciwstawiłem praktyczny sposób myślenia. To proza życia wymuszała na mnie pragmatyczne zachowania polegające na realistycznej ocenie rzeczywistości i podejmowaniu takich działań, które gwarantują skuteczność.

To co przeminęło, nie powraca już nigdy. Z pokorą musimy akceptować upływający czas i nasze w nim przemijanie, słabości ducha i ciała, ludzkie niedostatki. Stąd epilogiem nie mogą być tu nakazy, pouczenia, rady i opinie. Dzieje ludzkie to nic innego, jak wymuszona wymiana pokoleniowa, gdzie wartością i nieodzownym elementem staje się ludzka pamięć.

Kończąc, dedykuję wszystkim utwór – apel Adama Asnyka z 1880 r. wytyczający kierunki działania, szukania prawdy według własnego pomysłu, budowania przyszłości i realizacji własnych marzeń, szanując dokonania swoich poprzedników.

DO MŁODYCH

Szukajcie prawdy jasnego płomienia!
 Szukajcie nowych, nieodkrytych dróg...
 Za każdym krokiem w tajniki stworzenia
 Coraz się dusza ludzka rozprzestrzenia,
 I większym staje się Bóg!

Choć otrząśńcie kwiaty barwnych mitów,
 Choć rozproszycie legendowy mrok,
 Choć mgłę urojeń zedrzcicie z błękitów,
 Ludziom niebiańskich nie zbraknie zachwyków,
 Lecz dalej sięgnie ich wzrok.

Każda epoka ma swe własne cele
 I zapomina o wczorajszych snach...
 Nieście więc wiedzy pochodnię na czele
 I nowy udział bierzcie w wieków dziele,
 Przyszłości podnoście gmach!

Ale nie depreczcie przeszłości ołtarzy,
 Choć macie sami doskonalsze wznieść;
 Na nich się jeszcze święty ogień żarzy,
 I miłość ludzka stoi tam na straży,
 I wy winniście im cześć!

Ze światem, który w ciemność już zachodzi
Wraz z całą tęczą idealnych snów,
Prawdziwa mądrość niechaj was pogodzi –
I wasze gwiazdy, o zdobywcy młodzi,
W ciemnościach pogasną znów!

Janusz Mroczka

MISJA KATEDRY

Katedra Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej powstała w wierze, że czym większy wysiłek skierujemy w poznanie, tym głębsza będzie świadomość naszej podmiotowości.

Katedra to miejsce i wspólnota służąca prawdzie poznawanej i przekazywanej, gdzie spotykają się uczeni i uczniowie, profesorowie i studenci, zespoleni dążeniem do nauczania młodych oraz pomnażania dobra kulturowego ludzi.¹

¹ Słowa te wygłosił prof. Janusz Mroczka na pierwszym zebraniu Katedry w dn. 30.03.1998 r.

*fotowoltaika, organiczne ogniwa słoneczne,
fotowoltaika elastyczna, polimery, perowskity, nanocząstki*

Agnieszka IWAN^{1*}, Adam JANUSZKO¹,
Stanisław MALECZEK¹, Janusz MROCZKA²

ORGANICZNE ORAZ ELASTYCZNE OGNIWA FOTOWOLTAICZNE – RZECZYWISTOŚĆ I PERSPEKTYWY

Na podstawie przeglądu literatury oraz badań własnych nad ogniwami słonecznymi trzeciej i czwartej generacji przedstawiono analizę możliwości zastosowania w praktyce organicznych ogniw fotowoltaicznych. Omówiono rodzaje ogniw słonecznych z uwzględnieniem ich wad i zalet. Zaprezentowano stosowane metody pomiarowe do charakterystyki ogniw oraz poszczególnych warstw w organicznym ogniwie słonecznym. Przeanalizowano wybrane parametry techniczne poszczególnych rodzajów ogniw fotowoltaicznych, ze szczególnym uwzględnieniem sprawności ogniwa w zastosowaniach komercyjnych i warunkach laboratoryjnych. W pracy zaprezentowano ogólne założenia i postęp w realizacji projektu pt.: „Innowacyjne elastyczne pokrycie fotowoltaiczne”, realizowanego w ramach konkursu GEKON – Generator Koncepcji Ekologicznych Narodowego Centrum Badań i Rozwoju oraz Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej. Pracę zakończono przedstawieniem gotowych wyrobów opartych na ogniwach słonecznych wytworzonych w Wojskowym Instytucie Techniki Inżynierskiej we Wrocławiu (WITI) do zastosowań wojskowych.

1. WPROWADZENIE

Według raportu *The Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE* [1] w roku 2025 najtańszym źródłem energii będzie fotowoltaika. Szacuje się, iż koszt energii otrzymanej z paneli słonecznych w krajach środkowej i południowej Europy będzie wynosił około 4–6 eurocentów/kWh, natomiast około 2015 roku 2–4 eurocenty/kWh, czyli tyle co koszty wytworzenia jednego kilowata energii elektrycznej w elektrowniach spalających węgiel brunatny. W latach 1977–2015 ceny ogniw spadły dwukrotnie z 76,67 USD/wat do poziomu 0,36 USD/wat. Przewiduje się, że doce-

¹ Wojskowy Instytut Techniki Inżynierskiej im. Profesora Józefa Kosackiego, ul. Obornicka 136, 50-961 Wrocław.

* e-mail: iwan@witi.wroc.pl

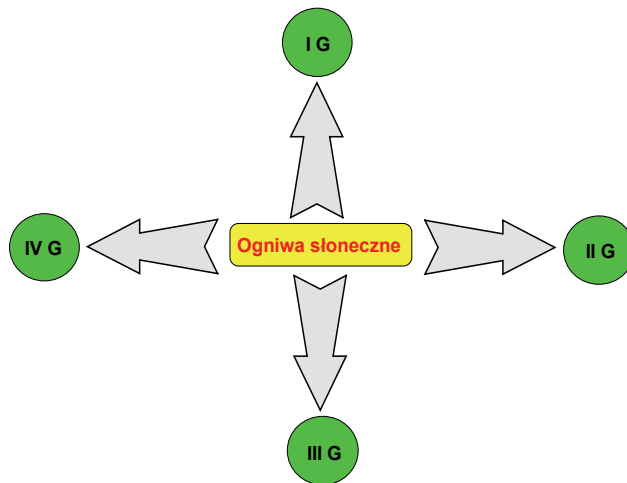
² Katedra Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej, Politechnika Wrocławska, ul. B. Prusa 53/55, 50-317 Wrocław.

lowo organiczne ogniwa fotowoltaiczne będą około 10 razy tańsze od ogniw krzemowych.

Najniższe koszty wytworzenia jednego kilowata energii elektrycznej, wynoszące około 4 centów na kilowatogodzinę, osiągnane są w elektrowniach spalających węgiel brunatny.

Pierwsza fabryka organicznych ogniw fotowoltaicznych powstała w 2008 r. w Massachusetts. W Polsce zaś firma ML System S.A., mieszcząca się w Zaczerniu koło Rzeszowa, to jeden z pionierów na polskim rynku w projektowaniu i wdrażaniu zintegrowanych systemów opartych na technologiach ogniw fotowoltaicznych (w tym ogniwach barwnikowych), także zintegrowanych z budynkami (ang. *Building Integrated Photovoltaics*, BIPV). Zgodnie z empirycznym prawem Swansona, dotyczącym trendu cenowego ogniw słonecznych, każde podwojenie zdolności produkcyjnych firm produkujących ogniwa słoneczne powoduje spadek cen ogniw o 20%.

Niestety precyzyjne określenie kosztów uzyskania energii elektrycznej z promieniowania słonecznego jest dość skomplikowane, choć nie niemożliwe i zależy od wielu czynników, takich jak: kosztów inwestycji, trwałości urządzeń wytwarzających prąd, kosztów utrzymania i obsługi, kosztów paliwa, kraju wytworzenia, podatków i oprocentowania kredytów czy warunków środowiskowych. Należy podkreślić, iż wśród kosztów uzyskania energii elektrycznej dominują koszty inwestycji oraz modułów fotowoltaicznych i innych urządzeń wytwarzających prąd elektryczny.

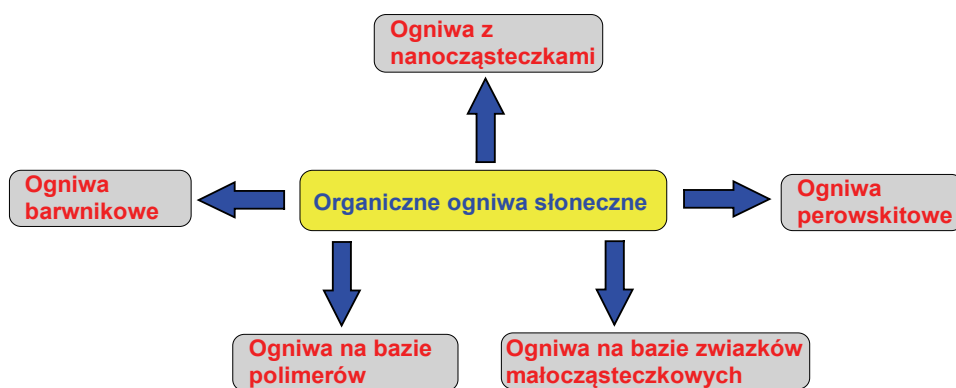


Rys. 1. Schematyczny podział ogniw słonecznych w zależności od rodzaju warstwy absorbującej: generacja I-IV (I G-IV G)

Fig. 1. Scheme of solar cells according type of absorbing layer: generation I-IV (I G-IV G)

Obecnie ogniwa fotowoltaiczne w zależności od rodzaju warstwy aktywnej w ogniwie dzieli się na ogniwa od pierwszej do czwartej generacji (I G-IV G). Sche-

matycznie podział ogniw w zależności od rodzaju warstwy absorbującej przedstawiono na rysunku 1. Ogniwa pierwszej i drugiej generacji (I G–II G) to ogniwa nieorganiczne, w tym oparte na krzemie monokrystalicznym, polikrystalicznym (I G), ogniwa typu CIGS oparte na związkach miedzi, indu, galu, seleniu (II G), a także bardzo wydajne ogniwa na bazie GaAs i innych materiałach AIII BV (II G). Ich udział procentowy na rynku jest obecnie największy i one osiągają obecnie najwyższą sprawność. Wśród ogniw trzeciej generacji (III G) należy wyróżnić organiczne ogniwa słoneczne zarówno polimerowe, jak i oparte na związkach małowartościowych oraz ogniwa barwnikowe, które przekształcają energię słoneczną za pomocą barwnika (tzw. ogniwa DSSC, ang. *dye-sensitized solar cell*). Ogniwa DSSC zostały po raz pierwszy opracowane przez Briana O'Regana i Michaela Grätzela, dlatego też określane są jako ogniwa Grätzela. Obecnie ogniwa barwnikowe wykazują maksymalną wydajność PCE na poziomie 15%. Ogniwa fotowoltaiczne czwartej generacji (IV G) obejmują ogniwa organiczne, w tym polimerowe zawierające np. nanoinkluzyje metaliczne (Ag, Au, Pt), modyfikowany chemicznie grafen, nanorurki, TiO_x czy ZnO, umiejscowione w różnym miejscu w ogniwie [2]. W ciągu ostatnich kilku lat odnotowano duży wzrost wartości sprawności (ang. *Power Conversion Efficiency*, PCE_{max}) organicznego ogniwa słonecznego od 5,15–8,3% w 2010 r., do 12% w 2012 r. oraz 13,2% w 2016 r. [3, 4]. Do ogniw trzeciej generacji zalicza się także ogniwa na bazie perowskitów, które obecnie osiągają sprawność $PCE_{max} = 22,1\%$. Schematyczny podział organicznych ogniw słonecznych przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Schematyczny podział organicznych ogniw słonecznych
Fig. 2. Scheme of various types of organic solar cells

Należy podkreślić, iż ogniwa słoneczne, będące składową modułów fotowoltaicznych, występują w dwóch podstawowych, dominujących i dopracowanych technologicznie konfiguracjach, to jest ogniw fotowoltaicznych różnych generacji (opisane powyżej) oraz tak zwanej skoncentrowanej fotowoltaiki (ang. *Concentrated*

Photovoltaic, CPV), w której wzrost sprawności ogniwa następuje dzięki zastosowaniu różnych układów optycznych, takich jak klasyczne soczewki, soczewki Fresnela, zwierciadła płaskie i wklęsłe – paraboliczne, zwierciadła wklęsłe liniowe, liniowe soczewki Fresnela oraz koncentratory luminescencyjne [5].

Niniejsza praca ma na celu usystematyzowanie wiedzy na temat organicznych ogniw słonecznych ze szczególnym zwróceniem uwagi na istniejące problemy związane z ich wytworzeniem, stabilnością w atmosferze powietrza, powtarzalnością oraz przeskalowaniem.

W pracy omówiono organiczne ogniwa słoneczne na bazie związków wielkocząsteczkowych (polimerów) i małowcząsteczkowych (oligomerów) zawierające także nanocząstki takie, jak srebro, nanorurki węgla czy grafen. Przedstawia analizę parametrów elektrycznych ogniw takich, jak *PCE*, współczynnik wypełnienia (ang. *Fill Factor, FF*), napięcie rozwarcia (ang. *Open Circuit Voltage, V_{oc}*) i prąd zwarcia ogniwa (ang. *Short Circuit Current, J_{sc}*) dokonaną na podstawie charakterystyki prądowo-napięciowej (J-U). Finalnie w pracy wykazano *Ile nieorganiki w organicznych ogniwach słonecznych?* oraz przedstawiono możliwości rozwoju fotowoltaiki organicznej, a także jej potencjalne aplikacje.

2. WADY I ZALETY OGNIW SŁONECZNYCH

Pomimo istniejących już komercyjnie dostępnych krzemowych ogniw słonecznych o sprawności umożliwiającej ich praktyczne zastosowanie, wciąż istnieje wiele wad, które motywują naukowców do udoskonalania architektury ogniw słonecznych oraz procesów konwersji energii słonecznej na energię elektryczną. W dalszej części zostaną omówione niektóre wady i zalety ogniw słonecznych generacji I G–IV G.

Wśród zalet fotowoltaiki organicznej, czyli ogniw generacji trzeciej i czwartej, należy wymienić: niższą toksyczność, elastyczność czy też lekkość w porównaniu do ogniw słonecznych nieorganicznych. Produkcja tych ogniw na wielką skalę jest łatwiejsza niż ogniw konstruowanych na bazie materiałów nieorganicznych. Ponadto organiczne ogniwa słoneczne mogą zawierać różnorodne związki chemiczne (polimery, dendrymery, oligomery czy ciekłe kryształy), co czyni je atrakcyjnymi pod względem różnorodności architektury ogniwa, modelowania parametrami elektrycznymi i morfologią warstw w ogniwie. Niestety wadą ogniw organicznych jest wciąż zbyt mała sprawność (*PCE* ~ 8–9%) w stosunku do innych technologii cienkowarstwowych, aczkolwiek obecnie nie jest to główny problem. Podstawowym, pozostającym wciąż do rozwiązania problemem dla organicznych ogniw słonecznych jest fakt ich krótkiej żywotności i stabilności w atmosferze powietrza, a także problem z przeskalowaniem technologii ze skali laboratoryjnej na półtechnologiczną czy technologiczną. Czyli wciąż istnieje ogólny problem z konstrukcją prototypu ogniwa gotowego do wdrożenia. Ponadto koszt wytworzenia organicznych ogniw fotowoltaicznych

w skali laboratoryjnej jest dość duży, ze względu na wysokie koszty zakupu poszczególnych materiałów do konstrukcji ogniw, np. P3HT (poli(3-heksylofien)), PCBM (ester metylowy kwasu [6,6]-fenylo-C₆₁-masłowego) czy podłoża ITO (tlenek indowocynowy). Należy jednak podkreślić, iż firma Heliatek uruchomiła już na bazie własnych opracowań pierwszą na świecie linię produkcyjną wytwarzającą elastyczne ogniwa słoneczne organiczne w tzw. procesie *roll-to-roll* o szerokości 0,3–2 metrów i dowolnej długości, o nazwie handlowej HeliaFilm® [6]. Otrzymane ogniwa elastyczne oparte na związkach organicznych małowcząsteczkowych wykazały tylko około 10% degradacji po upływie 3000 godzin, a szacowany czas ich użytkowania wynosi 25 lat. Wymagany standard dla przemysłowych ogniw słonecznych to 1000 godzin w 85 °C, promieniowanie 1000 W/m², oraz względna wilgotność powietrza w 85 °C.

Z kolei ogniwa DSSC charakteryzują się dużą sprawnością (15%), niskim kosztem wytwarzania, małym zużyciem materiałów organicznych oraz przezroczystością, mogą więc pełnić rolę szyb. Zaletą ogniw DSSC oraz ich przewagą nad ogniwami krzemowymi jest ich mała wrażliwość na kąt padania promieniowania słonecznego, toteż mogą działać efektywnie zarówno pod wpływem promieniowania odbitego, jak i załamane go, a także po częściowym zacieleniu [6, 7].

Wśród wad ogniw DSSC niewątpliwie należy wyróżnić problemy z elektrolitem ciekłym, dlatego obecnie prace trwają nad zastąpieniem go elektrolitem żelowym lub stałym [8–10]. Prowadzone są także prace nad zastąpieniem najbardziej kosztownych składników w ogniwie DSSC, to jest platyny i rutenu (w barwniku), tańszymi materiałami. Ogniwa DSSC mają także problem ze stabilnością długoterminową. Trwają prace nad zastąpieniem jodu w ogniwie, np. kobaltem, w celu ochrony ich przed degradacją długoterminową [11].

W roku 2014 pojawiły się doniesienia o możliwości wytworzenia wydajnych i tanich ogniw na bazie perowskitów. Czy będzie to przełom w rozwoju fotowoltaiki, pokaże przyszłość. Niewątpliwie próby zastosowania znanych od ponad stu lat perowskitów, które zostały odkryte przez rosyjskiego geologa Lwa Perowskiego w 1838 r., w fotowoltaice budzą nadzieje na sukces. Wśród wad ogniw perowskitowych należy wyróżnić obecny we wszystkich w składzie ołów, który zanieczyszcza środowisko i jest niebezpieczny dla zdrowia ludzi i zwierząt. Trwają prace nad zastąpieniem ołowiu w perowskitach, np. cyną, i tym samym zmniejszeniem toksyczności i kosztów produkcji ogniw. Ponadto ogniwa te mają, podobnie jak pozostałe, trzeciej generacji problem ze stabilnością w atmosferze powietrza (rozkładają się pod wpływem wilgoci) [12–14]. Do niewątpliwych zalet ogniw fotowoltaicznych opartych na perowskitach należy zaliczyć możliwość absorbowania światła o bardzo szerokim spektrum długości fali, wysoką sprawność (22%), niski koszt produkcji, elastyczność i małą wagę.

Ogniwa drugiej generacji obejmują cienkowarstwowe ogniwa z krzemu amorficznego (a-Si) oraz ogniwa cienkowarstwowe CdTe, CdS, CIGS oraz GaAs. Zaletą ogniw a-Si jest nawet 25-letnia trwałość, małe koszty produkcji, ze względu na mniej-

sze zużycie krzemu (grubość warstwy Si poniżej 2 μm), niska cena, brak toksycznych metali ciężkich oraz możliwość nanoszenia na podłoża w temperaturze około 75 °C. W porównaniu z ogniwami monokrystalicznymi cienkowarstwowe ogniwa z krzemu amorficznego wykazują mniejszą sprawność (12% dla a-Si oraz 25% dla Si monokrystalicznego). Ogniwa a-Si charakteryzują się stosunkowo dużą ilością zajmowanej powierzchni w stosunku do ich sprawności, co uznaje się za minus tej technologii [6]. Z kolei ogniwa CdTe wykazują większą sprawność konwersji w słabym oświetleniu w porównaniu do ogniw krzemowych oraz dużą sprawność (21%). Można wyróżnić następujące zalety ogniw cienkowarstwowych typu CIGS: wysoką sprawność (22%), małą wagę oraz możliwość absorpcji światła z różnych kierunków. Wśród wad ogniw typu CIGS wyróżnia się (i pracuje nad uproszczeniem) skomplikowany i trudny proces technologiczny oraz pracuje się nad eliminacją stosowanego w modułach CIGS kadmu [6]. Ogniwa na bazie arsenku galu (GaAs) to ogniwa o największej sprawności rzędu 32%. Wykazują one doskonałą trwałość ze względu na odporność na wilgoć oraz promieniowanie UV oraz doskonałą absorpcję światła ze względu na szerokie pasmo wzbronione. Są elastyczne i lekkie. Jako wady ogniw na bazie GaAs należy wymienić wysoką cenę i toksyczność odczynników chemicznych używanych podczas ich produkcji, co ogranicza zakres ich aplikacji do zasilania statków i sond kosmicznych. Ogniwa komercyjnie dostępne typu GaAs, InGaP czy InGaAs sprzedawane są przez firmy CESI, Spectrolab, czy Azur Space [6].

W ostatnich latach naukowcy skupili się na badaniu cienkowarstwowych, kestrytowych ogniw słonecznych charakteryzujących się wydajnością 9,6%. Ogniwa $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ są o tyle wyjątkowe, że wykonane są z tańszych, występujących w obfitości i bardziej przyjaznych dla środowiska materiałów, niż w przypadku ogniw typu CIGS czy CdTe i mogą w przyszłości stać się ich realnym zamiennikiem eliminującym toksyczny selen w CIGS-ach oraz obniżającymi koszty produkcji przez zastosowanie cyny i cynku zamiast indu [15, 16].

Ogniwa pierwszej generacji to ogniwa wytwarzane w technologii grubowarstwowej, do których zalicza się ogniwa na bazie krzemu mono- i polikrystalicznego. Ogniwa na bazie krzemu monokrystalicznego charakteryzują się dużą sprawnością (25,6%), trwałością do 25 lat oraz małą ilością zajmowanej powierzchni w stosunku do sprawności. Do ich wad należy zaliczyć wysoką cenę ogniwa związaną z kosztownością technologii oraz spadek sprawności w świetle rozproszonym. Z kolei ogniwa polikrystaliczne charakteryzują się mniejszą sprawnością niż ogniwa monokrystaliczne (21%), ale eliminują wady charakterystyczne dla tych ogniw [6].

Podsumowując, każda z omówionych generacji ogniw słonecznych ma zarówno zalety, jak i wady i tylko rodzaj aplikacji oraz parametry użytkowe ogniw determinują nasz wybór. Ogniwa pierwszej generacji znajdują obecnie zastosowanie podczas budowy mikroinstalacji, a także dużych systemów fotowoltaicznych (np. elektrowni, farm słonecznych). Ogniwa na bazie amorficznego krzemu są stosowane podczas produkcji lamp solarnych czy kalkulatorów, a także jako moduły. Ogniwa CIGS są sto-

sowane jako lekkie i elastyczne moduły na dachach, przenośnych elektrowniach oraz do zasilania pojazdów. Ogniwa na bazie GaAs jako elastyczne i lekkie ogniwa fotowoltaiczne znajdują zastosowanie jako ładowarki do telefonów, laptopów, w motoryzacji czy lotnictwie. Ogniwa DSSC znajdują zastosowanie jako szyby, szkła czy elementy fasadowe. Prace nad zastosowaniem ogniw DSSC w praktyce prowadzone są przez firmę Dyesol, brytyjską firmę G4 Innovations (ładowarki do telefonów komórkowych) oraz szwajcarską firmę Solaronix (moduły fotowoltaiczne oparte na ogniwach barwnikowych, ogniwa DSSC) [6].

Obecnie organiczne ogniwa słoneczne znajdują się w centrum zainteresowań firmy Heliatak ($PCE_{\max} = 13,2\%$ dla technologii *multijunction*, gdzie połączono trzy typy absorberów, z których każdy selektywnie absorbuje światło o różnej długości fali), oraz firmy Solarmer ($PCE_{\max} = 7,9\%$). Firma Heliatak w roku 2014 zainstalowała w Szanghaju pierwszy na świecie system fotowoltaiczny zintegrowany z budownictwem BIOPV (ang. *Building Integrated Organic Photovoltaic*) oparty na organicznych ogniwach fotowoltaicznych. Ogniwami BIOPV pokryto powierzchnię 20 m^2 , a łączna moc instalacji fotowoltaicznej wynosi tylko $0,62 \text{ kWp}$ (Wp to Watopiki, $\text{kWp} = 1000 \text{ Wp}$). Kolejna instalacja, w której zastosowano organiczne ogniwa słoneczne o różnej transparentności i kolorze, to instalacja w Singapurze, która obejmowała powierzchnię 226 m^2 , a jej moc osiągnęła 12 kWp . Firma Solarmer proponuje aplikacje organicznych ogniw słonecznych jako pokrycia plecaków, toreb czy też ładowarki do telefonów komórkowych. Przyszłość fotowoltaiki organicznej zależy w dużej mierze od ceny wytworzonej z użyciem jej energii oraz czasem życia ogniwa. Przewidywany przez Solarmer koszt ogniw fotowoltaicznych organicznych to $30\text{--}50$ dolarów/ m^2 , moc wyjściowa 30 W/m^2 , a czas życia 1–3 lata.

Analizując aspekty ekonomiczne i ekologiczne ogniw oraz modułów fotowoltaicznych nie sposób nie wspomnieć o recyklingu ogniw fotowoltaicznych, szczególnie tych najczęściej stosowanych – krzemowych. Stale zwiększająca się liczba produkowanych i instalowanych modułów fotowoltaicznych jest efektem pozytywnym dla ochrony środowiska i rozwoju odnawialnych źródeł energii (OZE), aczkolwiek z drugiej strony pojawia się poważny problem dotyczący zagospodarowania uszkodzonych i wyeksploatowanych modułów. Naukowcy opracowują przyjazne dla środowiska oraz ekonomicznie opłacalne technologie recyklingu wszystkich materiałów użytych do produkcji ogniw/modułów [17]. Nie jest to zagadnienie trywialne, biorąc pod uwagę różne metody wytwarzania ogniw fotowoltaicznych. Dla przykładu ogniwa monokrystaliczne wytwarzane są metodą Czochralskiego oraz metodą topienia strefowego (z ang. *float zone*). Z kolei ogniwa krzemowe polikrystaliczne są wytwarzane według metody ukierunkowanej krystalizacji i odlewania w formy (ang. *block casting*). Istnieje możliwość odzyskania podłoży krzemowych (z ogniw starszej generacji zawierających grubą warstwę krzemu, tj. ogniw zainstalowanych 25–30 lat temu) o parametrach elektrycznych analogicznych do ogniw wyprodukowanych i opartych na nowych materiałach. Problem recyklingu modułów fotowoltaicznych krzemowych obecnie

w Polsce nie istnieje ze względu na to, iż 25–30 lat temu nie były one instalowane w Polsce [17].

Poważnym problemem i wyzwaniem staje się recykling ogniw II generacji (cienkowarstwowych), których udział na rynku w ostatnich latach wzrasta.

3. WSPÓŁCZESNE TRENDY ORGANICZNYCH OGNIW SŁONECZNYCH

Trendy w rozwoju ogniw słonecznych trzeciej i czwartej generacji ulegają nieustannym modyfikacjom, a podyktowane są nie tylko rozwiązywaniem czy też eliminowaniem wciąż istniejących problemów związanych z ich żywotnością i wrażliwością na działanie atmosfery powietrza, ale głównie możliwością zastosowania nowych zarówno organicznych, jak i nieorganicznych związków jako głównych komponentów warstw lub jako domieszkę do warstwy aktywnej czy warstwy transportującej dziury (ang. *Hole Transporting Layer*, HTL).

Niewątpliwie wśród współczesnych trendów obserwowanych w fotowoltaice organicznej należy wymienić prace nad:

- Syntezą nowych materiałów organicznych o charakterze donorowym lub donoro-akceptorowym (polimery, kopolimery i związki małowcząsteczkowe) obejmującą niejednokrotnie wieloetapowe reakcje chemiczne zmierzające do otrzymania związków rozpuszczalnych i stabilnych w atmosferze powietrza [18–24].
- Otrzymaniem nowych materiałów o charakterze akceptorowym o odpowiednio dopasowanych poziomach HOMO-LUMO w stosunku do zastosowanego związku o charakterze donorowym, w celu efektywnej generacji ładunków i ich separacji [25, 26].
- Syntezą nowych elektrolitów żelowych lub stałych do zastosowania w ogniwach barwnikowych w zastępstwie stosowanych obecnie elektrolitów ciekłych [8–10].
- Syntezą nowych polimerów i związków organicznych dla zastosowań w ogniwach perowskitowych jako materiały o charakterze dziurowym (ang. *Hole Transporting Materials*) [27–29].
- Modyfikacją architektury polimerowych ogniw fotowoltaicznych objętościowych (*bulk heterojunction*, BHJ) obejmującą konstrukcje ogniw odwróconych (*invert solar cells*), tandemowych, a nawet potrójnych (*ternary solar cells*) oraz modyfikację metod wytwarzania poszczególnych warstw w ogniwie. Ponadto modyfikacja architektury ogniwa obejmuje także prace nad zastąpieniem ogniw na podłożach sztywnych (szkło) polimerowymi ogniwami fotowoltaicznymi na podłożach elastycznych [30–34].

- Zwiększeniem powierzchni aktywnej organicznych ogniw słonecznych.
- Modyfikacją zarówno anody, katody, jak i międzywarstw w ogniwie słonecznym przez zastosowanie modyfikowanego chemicznie grafenu, jako elektrod (jednej lub obu), lub międzywarstwy, zastąpienie anody z ITO, np. ZnO czy też wprowadzanie nanocząstek Ag, Au lub ich mieszaniny oraz TiO₂ do konstrukcji polimerowego/organicznego ogniwa fotowoltaicznego [2, 35, 36].
- Syntezą nowych polimerów w celu zastąpienia warstwy transportującej dziury PEDOT:PSS w ogniwie [37, 38].
- Zastosowaniem ciekłych kryształów w warstwie aktywnej ogniwa [39, 40].
- Polepszeniem trwałości ogniw przez udoskonalanie metod ich enkapsulacji [41, 42].
- Zastosowaniem różnych metod pomiarowych, np. spektroskopii impedancyjnej, metody kserograficznej, luminescencji czasowo-rozdzielczej czy EPR w celu interpretacji procesów zachodzących w polimerowym ogniwie fotowoltaicznym [43–49].
- Konstruowaniem zintegrowanych układów ogniwo-słonecznych – superkondensator oraz ogniwo słoneczne – bateria litowo-jonowa [50].

Schematycznie wybrane kierunki rozwoju fotowoltaiki organicznej przedstawiono na rys. 3.



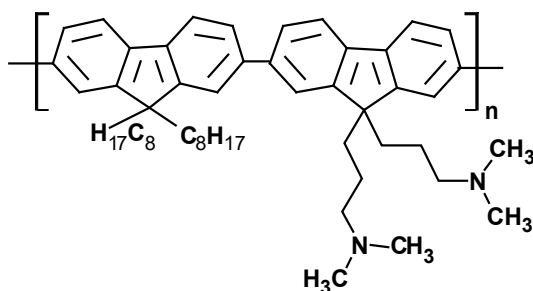
Rys. 3. Wybrane kierunki rozwoju organicznych ogniw słonecznych
Fig. 3. Scheme of selected directions of organic solar cell investigations

4. ZASADA DZIAŁANIA ORGANICZNYCH OGNIW SŁONECZNYCH

W roku 1959 Kallman i Pope [51] odkryli zjawisko fotowoltaiczne w kryształach antracenu, rozpoczynając tym samym rozwój technologii fotowoltaicznej organicznej. Od tego odkrycia minęło 59 lat, a wciąż wiele zjawisk związanych z działaniem organicznych ogniw słonecznych nie jest dostatecznie wyjaśnionych i dobrze zinterpretowanych. Zazwyczaj wyróżnia się sześć etapów prowadzących do efektu fotowoltaicznego, takich jak:

- absorpcja światła,
- powstawanie ekscytonu, czyli pary elektron-dziura,
- dyfuzja ekscytonu,
- rozdzielenie ładunków,
- transport ładunków,
- gromadzenie ładunków: elektronów na katodzie i dziur na anodzie.

Niestety efektywność działania organicznego ogniwa słonecznego jest w głównej mierze ograniczana przez występujące straty w trakcie zachodzenia zjawiska fotowoltaicznego. Wśród nich należy wyróżnić straty związane z: odbiciem i transmisją, samoistnym zanikiem ekscytonów, przesłaniem energii ekscytonu do defektu/domieszki, rekombinacji nośników ładunków i istnieniu barier przy elektrodach [52]. W celu eliminacji strat związanych z odbiciem stosowane są na przykład antyreflekcyjne powłoki (np. Al_2O_3 , Si_3N_4 , Ta_2O_5 , SiO_2 czy TiO_2 otrzymywanych metodą zolel) [53, 54]. Idealna wielkość drogi dyfuzji ekscytonów w polimerach powinna być równa grubości warstwy aktywnej. Najczęściej wynosi od około 10 do kilkuset nm. Dodatkowo, jeżeli różnice w wartościach potencjału jonizacji i powinowactwa elektronowego (HOMO-LUMO) materiałów o charakterze donorowo-akceptorowym nie są odpowiednie, ekscyton może bezpośrednio przeskoczyć na warstwę w ogniwie z mniejszą wartością przerwy energetycznej bez rozłożenia na ładunki. Ponadto między elektrodą a warstwą organiczną może wytworzyć się tak zwany kontakt blokujący, uniemożliwiający zbieranie ładunku na metalu, np. Al. Dlatego wprowadza się pomiędzy warstwę aktywną a katodę tak zwaną warstwę blokującą katodę, np. LiF, Ca, grafen czy też polimer PFN (rys. 4).



Rys. 4. Budowa chemiczna polimeru PFN
Fig. 4. Chemical structure of PFN

Kluczową kwestią jest wielkość przerwy energetycznej materiału organicznego, która bardzo często jest za duża (powyżej 2 eV). Aby zaabsorbować 77% promieniowania słonecznego, wymagana jest przerwa energetyczna (E_g) równa 1,1 eV. Dla polimerów $E_g = 2$ eV ogranicza możliwość absorpcji do około 30%. W celu rozwiązania tego problemu prowadzone są intensywne prace nad syntezą związków orga-

nicznych mało- i wielkocząsteczkowych o wartości przerwy energetycznej poniżej 2 eV [22]. Na wartość przerwy energetycznej polimeru wpływają takie czynniki, jak: wymiana ładunków między łańcuchami w polimerze, obecność w łańcuchu ugrupowań aromatycznych, podstawników oraz oddziaływania międzycząsteczkowe i długość koniugacji łańcucha polimerowego.

Podsumowując, należy zadać sobie pytanie *Co wpływa w polimerach na wartość sprawności organicznych ogniw fotowoltaicznych?* Wśród wielu czynników niewątpliwie należy wymienić:

- grubość i jednorodność warstwy polimerowej oraz jej wpływ na drogę dyfuzji ekscytynu w polimerze,
- sposób wytwarzania cienkich warstw,
- wygrzewanie warstw,
- wartość przerwy energetycznej,
- wartości poziomów HOMO-LUMO,
- maksimum i zakres pasma absorpcji,
- ruchliwość nośników ładunków (dziur i elektronów),
- wartości masy molowej polimeru,
- polidispersyjność,
- regioregularność i konformacje łańcuchów,
- rozpuszczalność polimeru, rodzaj użytego rozpuszczalnika oraz stężenie roztworu.

Podstawowe parametry charakteryzujące ogniwo słoneczne to: sprawność (ang. *Power Conversion Efficiency*, η , *PCE*), współczynnik wypełnienia (ang. *Fill Factor*, *FF*), napięcie obwodu otwartego (ang. *Open Circuit Voltage*, V_{oc}) i gęstość prądu zwarcia ogniwa (ang. *Short Circuit Current*, J_{sc}). Parametr V_{oc} określa napięcie na końcach otwartego ogniwa fotowoltaicznego w określonej temperaturze i o określonym natężeniu promieniowania. Wartość V_{oc} wzrasta wraz ze zmniejszaniem się poziomu HOMO. Wartość napięcia rozwarcia $V_{oc_{max}} = 1,02$ V dla wartości HOMO = $-5,56$ eV została otrzymana dla ogniwa z warstwą aktywną P3HT:D99'BF, gdzie 12-(3,6-dimethoxy-fluoren-9-ylidene)-12H-dibenzo[b,h]fluorine to D99'BF [55]. Z kolei dla ogniwa z warstwą aktywną P3HT:PCBM wartość napięcia obwodu otwartego wynosi 0,6 V [56], a dla ogniwa z PBDT-TS1 $V_{oc} = 0,8$ V [57]. Z kolei dla ogniw tandemowych, składających się z dwóch różnych warstw aktywnych objętościowych przedzielonych międzywarstwami typu

PDCBT:PCBM/MoO₃/Ag/ZnO/PFN PBDT-TS1:PCBM [58] i

PIDT-PhanQ:PCBM/MoO₃/Ag/PFN/PTB7:PCBM,

wartość V_{oc} otrzymano na poziomie 1,60 V [59]. W celu zwiększenia wartości V_{oc} prowadzone są prace nad syntezą nowych akceptorów dla fotowoltaiki organicznej.

Z kolei prąd zwarcia (I_{sc}) określa natężenie prądu wyjściowego ogniwa fotowoltaicznego w warunkach zwarcia w określonej temperaturze i o określonym natężeniu promieniowania. Wartość J_{sc} zwiększa się wraz ze zmniejszaniem się wartości przerwy energetycznej E_g . Maksymalną wartość $J_{sc_{max}} = 19,25 \text{ mA/cm}^2$ otrzymano dla polimeru PTB7 [60]. Aczkolwiek można w literaturze znaleźć również dane dla organicznych ogniw słonecznych z anodą na bazie nanorurek węglowych jednościennej (SWNT), gdzie wartość J_{sc} wynosi 24 mA/cm^2 dla architektury ogniwa SWNT/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al ($PCE = 4,9\%$) [61].

Ogniwa słoneczne, zawierające jako akceptor $PC_{71}BM$, wykazują silną absorpcję w zakresie UV-Vis i wykazują większą wartość J_{sc} o około 20% niż ogniwa fotowoltaiczne z PCBM [56]. W celu zwiększenia natężenia prądu zwarcia prowadzone są intensywne prace nad otrzymaniem zarówno nowych akceptorów, jak i kopolimerów o charakterze donorowo-akceptorowym. Ponadto w celu zwiększenia wartości J_{sc} pożądanym jest wzrost zewnętrznej wydajności kwantowej (ang. *External Quantum Efficiency, EQE*) oraz średniej szerokości połówkowej (ang. *Full Width at Half-Maximum, FWHM*) [56].

Sprawność ogniwa fotowoltaicznego można wyrazić matematycznie jako stosunek maksymalnej mocy uzyskiwanej z ogniwa słonecznego do mocy padającego światła. Wzór na obliczenie sprawności ogniwa PCE przedstawia równanie (1), gdzie: P_{in} jest natężeniem światła padającego, wyrażone w W/m^2

$$PCE = V_{oc} \times I_{sc} \times FF/P_{in} \quad (1)$$

Z kolei współczynnik wypełnienia FF można przedstawić za pomocą algorytmu (2), gdzie I_{mpp} i V_{mpp} są odpowiednio wartością prądu i napięcia punktu o największej mocy:

$$FF = I_{mpp} \times V_{mpp}/I_{sc} \times V_{oc} \quad (2)$$

Wartość FF związana jest z morfologią wytworzonej warstwy i wzrasta wraz ze zmniejszaniem się rezystancji szeregowej R_s i zwiększaniem rezystancji równoległej R_{sh} . Maksymalna wartość FF równa jest 70% [56].

Ważnym parametrem określającym ogniwo słoneczne jest zewnętrzna wydajność kwantowa EQE definiowana jako liczba wygenerowanych elektronów po absorpcji jednego fotonu (bez poprawki na straty związane z odbiciem) dla światła monochromatycznego o danej długości fali. Wartość EQE wyrażona równaniem (3) opisuje zakres spektralny, w którym ogniwo pracuje efektywnie.

$$EQE = \eta_A \times \eta_{diff} \times \eta_{diss} \times \eta_{tr} \times \eta_{cc} \quad (3)$$

gdzie: η_A – współczynnik absorpcji fotonu, η_{diff} – współczynnik dyfuzji ekscytonu, η_{diss} – współczynnik dysocjacji ekscytonu, η_{tr} – współczynnik transportu nośników ładunku oraz η_{cc} – współczynnik odebrania ładunku.

5. STOSOWANE TECHNIKI POMIAROWE DLA ORGANICZNYCH OGNIW SŁONECZNYCH I POSZCZEGÓLNYCH WARSTW W OGNIWIE

Techniki pomiarowe stosowane w organicznych ogniwach słonecznych można podzielić pod względem charakterystyki gotowych wytworzonych ogniw lub też poszczególnych warstw czy materiałów stosowanych do ich konstrukcji. Oddzielnie należy wymienić metody stosowane do wytwarzania warstw w ogniwie słonecznym, odgrywające kluczową rolę w konstrukcji wydajnych ogniw słonecznych.

W celu analizy właściwości fotowoltaicznych wytworzonych ogniw słonecznych wykonywane są badania prądowo-napięciowe podczas naświetlenia 100 mW/cm^2 , stosując lampę ksenonową. Otrzymane wartości I_{sc} i U_{oc} oraz FF służą do wyliczenia sprawności ogniwa PCE . Bardzo ważne jest właściwe określenie rozmiaru naświetlanej aktywnej części ogniwa (szczególnie w przypadku ogniw wielopikselowych organicznych), tak aby otrzymane wartości nie były zafałszowane [62]. Charakterystyki i parametry badanych ogniw fotowoltaicznych polimerowych wyznaczane są po użyciu zintegrowanego systemu pomiarowego odzwierciedlającego standardowe warunki STC (ang. *Standard Test Condition*, tj. warunki oświetlenia AM 1,5G dla 1000 W/m^2 , temperatura ogniwa $25 \text{ }^\circ\text{C}$).

Kolejnym parametrem wyznaczanym dla ogniw słonecznych jest zewnętrzna wydajność kwantowa (EQE) oznaczająca liczbę fotonów, które konwertowane są na elektrony wewnątrz ogniw fotowoltaicznych. Wartość EQE może wynosić 60–90% w zależności od rodzaju ogniwa słonecznego. Naukowcy z National Renewable Energy Laboratory (NREL) skonstruowali ogniwa słoneczne wykazujące zewnętrzną wydajność kwantową równą 114%, dzięki zastosowaniu kropek kwantowych.

Kolejną metodą umożliwiającą analizę właściwości elektrycznych ogniw słonecznych jest metoda spektroskopii impedancyjnej [63, 64]. Umożliwia ona określenie czasu relaksacji ogniw fotowoltaicznych oświetlanych i nieoświetlanych dla różnej wartości natężenia oświetlenia. Na podstawie otrzymanych wyników można wywnioskować o generacji ładunku w ogniwie pod wpływem oświetlenia.

W celu określenia stabilności ogniw słonecznych w warunkach atmosferycznych wykonuje się także badania w komorach klimatycznych z regulowaną wartością naświetlenia, temperatury i wilgotności w określonym przedziale czasu. Uzyskane wyniki umożliwiają wysunięcie wniosków odnośnie do stopnia degradacji ogniw i ich trwałości [62].

Kolejna grupa technik badawczych dotyczy analizy zjawisk i procesów fizycznych zachodzących w poszczególnych warstwach w ogniwie słonecznym organicznym lub w materiałach tworzących warstwy ogniwa. Pierwszą z metod jest spektroskopia UV-Vis ułatwiająca dopasować/porównać widmo absorpcji do widma słonecznego. Badania UV-Vis wykonuje się zarówno dla związków organicznych, jak i dla ich mieszanin z fulerenami czy nanozwiązkami nieorganicznymi [46, 65].

Bardzo użyteczną metodą jest czasowo rozdzielona luminescencja wykonywana zarówno dla polimerów, jak i ich mieszanin z fulerenami [46, 48]. Intensywność i szybkość zaniku czasowo rozdzielonej luminescencji umożliwiają ocenę efektywności procesów przekazu i separacji ładunku oraz ich przydatności do zastosowań w fotowoltaice już na etapie badań nad materiałami. Metoda ta jest skutecznym sposobem na eliminację niepotrzebnych kosztów związanych z wytworzeniem niewydajnych ogniw słonecznych.

Pomiary elektronowego rezonansu spinowego (ESR) można z kolei traktować jako niezależną metodę weryfikacji efektywności procesów przekazu i separacji ładunku. Detekcję sygnału *ESR* można prowadzić, bądź zmieniając częstość promieniowania elektromagnetycznego dla stałej wartości indukcji zewnętrznego pola magnetycznego, bądź zmieniając indukcję pola magnetycznego dla stałej częstości promieniowania. W zależności od zastosowanego emitera pomiar może być prowadzony dla różnych długości fali promieniowania elektromagnetycznego [46, 48].

Bardzo ważny, jeśli idzie o efektywność skonstruowanych ogniw, jest pomiar ruchliwości nośników ładunków wyrażany w m^2/Vs . Na wartość ruchliwości nośników ładunku ma wpływ przede wszystkim temperatura oraz morfologia warstwy zależna od metody wytwarzania, a także sposób wytworzenia i przechowywania warstwy [66]. Wartość ruchliwości nośników ładunków niestety w istotny sposób zależy od zastosowanej metody pomiarowej i może to być metoda czasu przelotu nośników ładunku (ang. *Time of Flight*, ToF), metoda prądów ograniczonych ładunkiem przestrzennym (ang. *Space Charge Limited Currents*, SCLC), metoda z zastosowaniem tranzystorów z efektem polowym (oFET) oraz czasowo rozdzielcze techniki mikrofalowe (ang. *Time Resolved Microwave Conductivity*, TRMC) [66]. Niestety zbyt wiele czynników ma wpływ na otrzymane wartości ruchliwości nośników ładunków, które w zależności od metody pomiaru mogą się różnić nawet o kilka rzędów wielkości.

Ruchliwość nośników ładunków oraz fotogeneracja są podstawowymi procesami zjawiska fotoprzewodnictwa. Mechanizmy fotogeneracji zależą od rodzaju i typu przewodnictwa zarówno polimeru, jak i domieszki [49]. Wśród klasycznych pomiarów fotogeneracji należy wyróżnić metody: kserograficzną, pomiaru przejściowego fotoprądu skrośnego oraz wygaszania przejść S1-S0 za pomocą wygaszania fluorescencji polem elektrycznym czy przez zastosowanie metody fotoakustycznej [49]. Metoda kserograficzna jest szeroko rozwijana na Politechnice Łódzkiej w zespole prof. Jacka Ulańskiego i polega na pomiarze zaniku potencjału naładowanej powierzchni podczas jej oświetlenia (przez wyładowanie koronowe).

Istotny wpływ na parametry elektryczne konstruowanych organicznych ogniw słonecznych mają zastosowane techniki wytwarzania warstw. Najczęściej warstwy w warunkach laboratoryjnych wytwarzane są metodą wylewania roztworu na podłoże wirujące (ang. *spin coating*). Metoda ta umożliwia wytworzenie jednorodnej warstwy grubości od nm do μm charakteryzującej się dość dobrą powtarzalnością i jednorodnością. Niestety nie nadaje się ona do wytwarzania warstw o większych powierzch-

niach. Do wytworzenia większych powierzchni stosowana jest technika tzw. listwy rozwijającej (ang. *doctor blade*) oraz rolki rozwijającej (ang. *metering rod*). Niestety te metody są nieefektywne podczas wytwarzania jednorodnych warstw na dużych powierzchniach i odznaczają się ich niejednorodnością, aczkolwiek wymagają bardzo małej ilości roztworu, a pozostałość może być ponownie wykorzystana do wytworzenia kolejnej warstwy. Doniesienia literaturowe na temat efektywności techniki typu *doctor blade* są niejednoznaczne.

W pracy [67] autorzy otrzymali dla polimerowego ogniwa słonecznego objętościowego o architekturze ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM (1:1)/Ca/Al (o powierzchni aktywnej $0,04 \text{ cm}^2$) dla warstwy aktywnej wytwarzanej metodą *doctor blade* z roztworu toluenu (który jest rozpuszczalnikiem mniej toksycznym niż dichlorobenzen czy chlorobenzen, zazwyczaj stosowane w metodzie nanoszenia wirowego) znacznie lepsze wartości parametrów fotowoltaicznych niż dla ogniw z warstwą aktywną wytworzona metodą *spin-coating*, jak np.:

	J_{sc}	U_{oc}	FF	PCE
spin:	$9,25 \text{ mA/cm}^2$,	$0,59 \text{ V}$,	47% ,	$2,6\%$
blade:	$11,07 \text{ mA/cm}^2$,	$0,59 \text{ V}$,	53% ,	$3,5\%$

Także w pracy [68] autorzy wykazali pozytywny wpływ zastosowania urządzenia do nanoszenia cienkich warstw typu *doctor blade* na wartości parametrów fotowoltaicznych polimerowego ogniwa słonecznego o architekturze ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF/Al w porównaniu z techniką *spin-coating*:

	J_{sc}	U_{oc}	FF	PCE
spin:	$8,91 \text{ mA/cm}^2$,	$0,58 \text{ V}$,	62% ,	$3,16\%$
blade:	$9,40 \text{ mA/cm}^2$,	$0,59 \text{ V}$,	64% ,	$3,56\%$

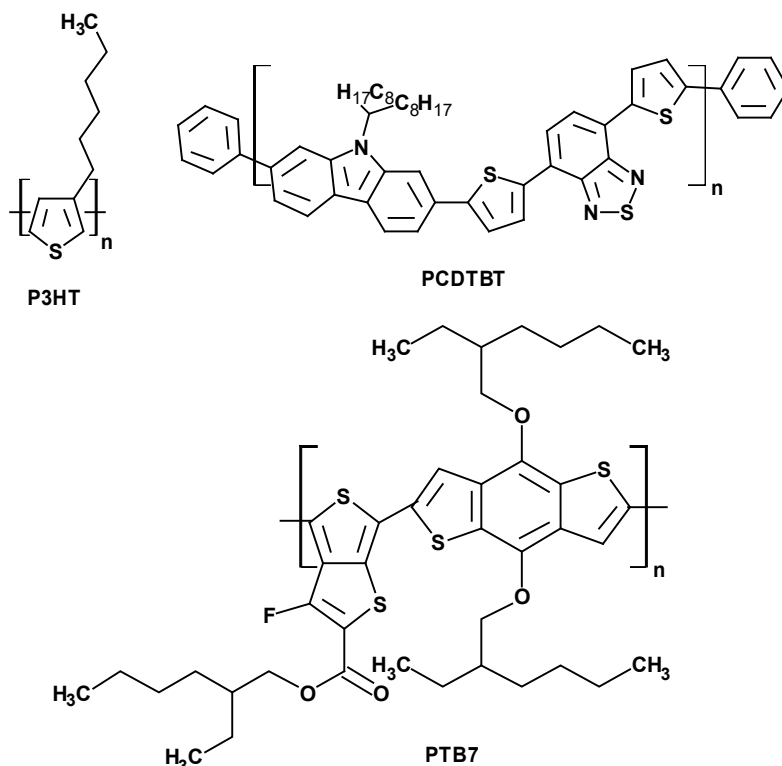
Porównanie powszechnie stosowanej techniki nanoszenia warstw metodą nanoszenia wirowego z metodą *doctor blade* może przyczynić się do zoptymalizowania warunków nanoszenia warstw o różnym składzie, lepkości, a także możliwości stosowania różnych rozpuszczalników.

W przemyśle jako metody wytwarzania warstw w fotowoltaice o dużej powierzchni dominują techniki typu *roll-to-roll* czy druk sitowy [69]. W technologiach tych wymagane są roztwory o dużej lepkości. Prowadzone są również prace nad zastosowaniem techniki drukowania strumieniowego atramentem lub kroplami roztworu (ang. *inkjet printing*) oraz drukowanie strumieniem areozolu (ang. *aerosol jet*) [69]. Metody te są ekonomiczne oraz przyjazne dla środowiska dzięki maksymalnemu wykorzystaniu przygotowanych roztworów i braku produktów ubocznych podczas nanoszenia warstw. Morfologię wytworzonych warstw analizuje się na podstawie mikroskopii AFM, SEM i TEM [62, 64].

Podsumowując, tylko kompleksowa analiza zarówno poszczególnych materiałów, warstw, jak i gotowych ogniw słonecznych pod kątem ich właściwości optycznych, elektrycznych, strukturalnych, a także mechanicznych (w przypadku ogniw elastycznych) może przyczynić się do rozwoju tematyki ogniw słonecznych w kierunku podwyższenia stopnia ich tzw. gotowości technologicznej (ang. *Technology Readiness Level*, TRL), czyli przybliżenia konstruowanych organicznych ogniw słonecznych do wdrożenia.

6. MATERIAŁY ORGANICZNE I NIEORGANICZNE STOSOWANE W FOTOWOLTAICE ORGANICZNEJ

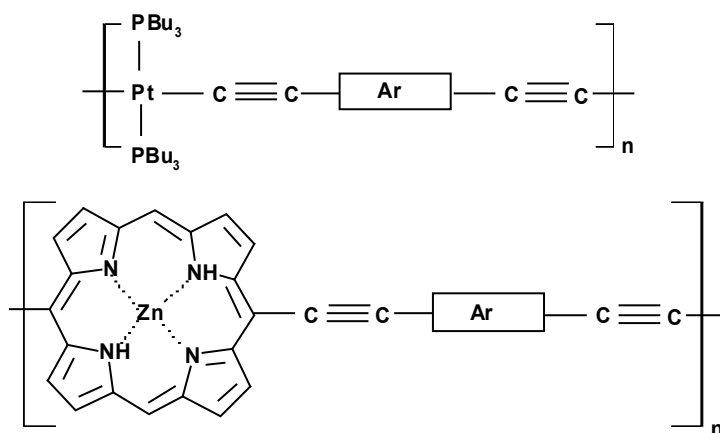
W fotowoltaice polimerowej wśród najczęściej stosowanych polimerów komercyjnych o charakterze donorowym należy wymienić P3HT, PCDTBT i PTB7 o budowie chemicznej, przedstawionej na rys. 5.



Rys. 5. Budowa chemiczna P3HT, PCDTBT i PTB7
Fig. 5. Chemical structure of P3HT, PCDTBT and PTB7

Wśród stosunkowo nowych polimerów proponowanych do zastosowania w fotowoltaice organicznej interesującą grupę stanowią metalopolimery, np. zawierające ugrupowania porfiryny cynku czy też poliacetyleny z atomami platyny, o ogólnej budowie chemicznej przedstawionej na rys. 6, aczkolwiek ich sprawność nie przekracza 3% [70].

Materiały o charakterze akceptorowym najczęściej stosowane są jako pochodne fulerenów o nazwach skróconych PCBM czy PC71BM oraz fulereny C60 czy C70. Prowadzone są również intensywne prace nad syntezą nowych pochodnych fulerenów oraz nad syntezą materiałów o charakterze akceptorowym związków zawierających w swej budowie chemicznej ugrupowania fulerenowe w łańcuchu głównym lub w bocznym, np. poliimidu. Jako akceptory zastosowane w fotowoltaice szeroko badane są imidy i ich pochodne.



Rys. 6. Budowa chemiczna wybranych metalopolimerów
Fig. 6. Chemical structure of organometallic polymers

Ponadto poza modyfikacją polimerów w warstwie aktywnej prowadzone są intensywne badania nad zastąpieniem powszechnie stosowanego PEDOT:PSS jako warstwy transportującej dziury polimerami stabilniejszymi w warunkach atmosferycznych, np. polianiliną (PANI), a także domieszkowanie PEDOT:PSS nanozwiązkami srebra, złota czy też ich mieszaniną.

Interesującym kierunkiem badań są również próby bądź domieszkowania, bądź zastąpienia warstwy PEDOT:PSS grafenem (GO) czy nanorurkami węgla. Dla ogniwa słonecznego o architekturze ITO/PEDOT:GO (pH = 9)/PTB7:PC₇₀BM/Al otrzymano sprawność $PCE = 8,21\%$, podczas gdy dla ogniwa z warstwą PEDOT:PSS sprawność wynosiła $7,04\%$ [71]. Grafen czy też jego modyfikacje chemiczne były również stosowane jako jedna bądź obie elektrody w organicznym ogniwie słonecznym, a także jako domieszka do warstwy aktywnej czy też elastyczne podłoże. Jednak najlepsze parametry fotowoltaiczne uzyskano, umieszczając grafen jako domieszki do warstwy

PEDOT:PSS, i jest to przyszłościowy kierunek badań. Sprawność organicznych ogniw słonecznych z grafenem w innym miejscu w ogniwie niż w warstwie transportującej dziury nie przekracza 3%. Należy jednak podkreślić, iż potencjał aplikacyjny grafenu w fotowoltaice organicznej w dużej mierze zależy od właściwości fizykochemicznych wytworzonego grafenu, czyli rezystancji czy pracy wyjścia.

Analogicznie do przypadku grafenu także nanorurki węglowe są badane w organicznych ogniwach słonecznych w kierunku polepszenia parametrów elektrycznych wytworzonych ogniw, czyli zwiększenia efektywności zbierania elektronów przez ogniwa.

Niestety podczas syntezy powstaje mieszanina nanorurek węglowych zarówno o charakterze półprzewodnikowym, jak i metalicznym. Najnowsze badania wykazały, iż tylko nanorurki węglowe o charakterze półprzewodnikowym wpływają na wzrost sprawności ogniwa. Nanorurki o charakterze metalicznym niestety zmniejszają sprawność ogniw słonecznych. Wadą nanorurek węglowych jest ich tendencja do zlepiania się ze sobą, co utrudnia ich separację dla konkretnych zastosowań. W przypadku nanorurek węglowych najwyższą sprawność na poziomie 8,6% uzyskano dla ogniwa o architekturze ITO/PEDOT:PSS/PTB7:PC71BM:MWCNT/Ca/Al z nanorurkami MWCNT umieszczonymi jako domieszka do warstwy aktywnej w ogniwie o powierzchni 0,0314 cm² [2]. Nanorurki węglowe były także badane jako anoda lub warstwa transportująca dziury w organicznym ogniwie słonecznym, gdzie uzyskano sprawności na poziomie odpowiednio 4,13% (szkło/SWCNT/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Ca/Al) i 3,05% (szkło/ITO/SWCNT/P3HT:PCBM/Al), [72, 73].

Organiczne ogniwa słoneczne z nanoinkluzjami plazmonicznymi (Ag, Au, Al) umieszczanymi w różnym miejscu w ogniwie, czyli jako domieszka do warstwy PEDOT:PSS czy też do warstwy aktywnej, wykazują różną sprawność w zależności od miejsca ich umieszczenia, stężenia domieszki, jej rozmiarów i rodzaju zastosowanego rozpuszczalnika. Ponadto bardzo istotny jest rodzaj zastosowanego polimeru jako donora w warstwie aktywnej. Umieszczenie w warstwie półprzewodnika nanoinkluzji plazmonicznych w postaci, np. nanocząstek Ag powinno umożliwić otrzymanie polimerowych ogniw słonecznych zdolnych do zwiększenia pułpki światła i tym samym zwiększenia ich efektywności. Aczkolwiek obecne badania wykazują niejednoznaczny wpływ nanoinkluzji plazmonicznych na zmianę sprawności organicznych ogniw słonecznych, co jest również podyktowane różną metodologią wytwarzania warstw z nanoinkluzjami. Dla ogniwa o architekturze ITO/PEDOT:PSS z Ag (Au lub mieszaniną Ag z Au)/PTB7:PC71BM/Ca/Al otrzymano sprawność $PCE = 8,01\%$, $8,16\%$ i $8,67\%$, odpowiednio, natomiast dla ogniwa bez nanoinkluzji sprawność wynosiła $7,25\%$ [74]. O efektywności zastosowanych nanocząstek w ogniwie zdecydował ich rozmiar 40–50 nm, który był dopasowany do grubości warstwy PEDOT:PSS (60 nm) i tym samym nie naruszał morfologii powierzchni PEDOT:PSS. Podobny wniosek można wysnuć z pracy [75], gdzie badano zarówno wpływ zastosowanego polimeru, jak i rodzaju nanoinkluzji plazmonicznych. Dla ogniw ITO/

PEDOT:PSS:Ag (Au lub Au pokryte Ag)/PCDTBT:PC₇₁BM/TiO_x/Al otrzymano sprawność $PCE = 7,35\%$, $6,01\%$ i $6,08\%$, odpowiednio, dla ogniw zaś z warstwą aktywną PTB7:PC₇₁BM i nanoinkluzjami Au w warstwie PEDOT:PSS $PCE = 8,31\%$, a dla nanocząstek Au pokrytych Ag o wielkości 60 nm PCE wzrósł do $9,19\%$. Różnice w sprawności ogniw słonecznych z tymi samymi nanocząstkami wynikają prawdopodobnie z lepszego lub gorszego dopasowania poziomów HOMO-LUMO w ogniwie.

Nowym i perspektywicznym kierunkiem rozwoju fotowoltaiki organicznej bez wątplenia jest fotowoltaika elastyczna, gdzie za podłoże elastyczne stosowany jest najczęściej poli(tereftalan etylenu) (PET) [76, 77]. Prowadzone są również prace nad zastosowaniem podłoża elastycznego i jednocześnie elektrody (anody) grafenu (G), aczkolwiek otrzymane wartości PCE nie są wciąż zadowalające [78]. Dla ogniwa o architekturze PET/G/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Ca (lub TiO₂)/Al otrzymano sprawność $2,54\%$ [79].

Interesującym pomysłem jest zastosowanie elastycznego podłoża w ogniwie słonecznym polipropylenu (PP), aczkolwiek w tym wypadku ogniwo jest naświetlane od strony cienkiej, kilkunanometrowej katody aluminiowej ze względu na ograniczoną przepuszczalność światła od strony PP. Dla ogniwa o architekturze PP/Ag/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF/Al otrzymano sprawność $0,33\%$ oraz $FF = 37\%$, co nie czyni tego ogniwa atrakcyjnym w zastosowaniu praktycznym, ale sam pomysł wydaje się interesujący [80]. Należy wspomnieć również o elastycznych technologiach fotowoltaicznych stosowanych w ogniwach I i II generacji, w tym z użyciem szkła Willow jako elastycznego podłoża w fotowoltaice [30].

Na zakończenie tego rozdziału zostanie przytoczonych kilka interesujących przykładów wykorzystujących naturę do generacji energii elektrycznej z energii słonecznej. Biofotowoltaika to technologia wykorzystująca fotosyntezę do przetwarzania światła słonecznego na energię elektryczną. W *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) opracowano sposób wykorzystania cząsteczki peptydu PS-I, odpowiedzialnej w roślinach za fotosyntezę, do zastosowania w panelu słonecznym. Zaproponowane rozwiązanie (tzw. *system Mershina*) polegało na przygotowaniu mieszaniny na bazie skoszonej trawy z niedrogim stabilizującym proszkiem peptydów, a następnie pomalowanie powierzchni (szklanej bądź metalowej) wytworzoną mieszaniną, która będzie generować energię elektryczną w procesie fotosyntezy. Otrzymano następujące parametry elektryczne $V_{oc} = 0,5$ V i $FF = 71\%$ [81].

Kolejną pracą realizowaną również w zakresie biofotowoltaiki w MIT, pod kierownictwem prof. Angeli Belcher, jest odkrycie możliwości zastosowania genetycznie zmodyfikowanego wirusa M13 do kontrolowania ułożenia nanorurek węglowych na powierzchni, dzięki czemu są one od siebie odseparowane. Uniemożliwia to zbijanie się ich w grupy oraz ogranicza powstawanie tzw. krótkich spięć, co ułatwia konstrukcję z ich udziałem bardziej wydajnych ogniw słonecznych. Dla wytworzonych ogniw słonecznych, zawierających wirus M13, TiO₂ i nanorurki węglowe, otrzymano wzrost PCE aż o 33% z 8 do $10,6\%$ [82].

Kolejnym rodzajem ogniw z zakresu biofotowoltaiki są tzw. okrzemkowe ogniwa słoneczne o innowacyjnie wytworzonej strukturze, zaproponowane przez prof. G. Rorrera z Uniwersytetu Stanu Oregon. Zaproponowane rozwiązanie obejmuje trzy główne etapy takie, jak:

1. Osadzenie okrzemek na podłożu szklanym.
2. Usunięcie części organicznej okrzemek, ale bez naruszenia skorupki krzemionkowych, czyli pozostaje warstwa szklana pokryta SiO_2 .
3. Zanurzenie podłoża szklanego z SiO_2 do roztworu z nanocząstkami TiO_2 , pełniącymi rolę półprzewodnika. Podobnie jak w przypadku zastosowania nanocząstek plazmowych (Ag , Au) także i w tym przypadku dzięki inteligentnemu ukształtowaniu podłoża możliwe jest wielokrotne odbijanie się fotonów światła od podłoża i w ten sposób generowanie większej liczby ekscytonów i przekształcanie energii słonecznej na energię elektryczną [83].

Kolejnym przykładem biofotowoltaiki są celulozowe (CNC) ogniwa słoneczne o architekturze $\text{CNC}/\text{Ag}/\text{PEIE}/\text{PBDTTT-C}:\text{PCBM}/\text{MoO}_3/\text{Ag}$, gdzie PBDTTT to [poly [(4,8-bis-(2-ethylhexyloxy)-benzo[1,2-b:4,5-b9] dithiophene)-2,6-diyl-alt-(4-(2-ethylhexanoyl)-thieno[3,4-b] thiophene)-2,6-diyl] wytworzone przez naukowców z *Georgia Institute of Technology* oraz *Purdue University*. W celu modyfikacji pracy wyjścia warstwy Ag zastosowano etoksylovaną polietylenoiminę (PEIE). Zaproponowane ogniwa słoneczne osiągają obecnie sprawność PCE równą 2,7%, $U_{oc} = 0,65 \text{ V}$, $J_{sc} = 7,5 \text{ mA}/\text{cm}^2$ i $FF = 0,54$.

Niestety ogniwa te rozpuszczają się w wodzie, co je uatrakcyjnia ze względu na późniejszy łatwy recykling, ale z drugiej strony czyni je ogniwami jednorazowymi, które nie mogą znaleźć zastosowania w warunkach rzeczywistych [84].

Na zakończenie należy wspomnieć o sprzężonych, fotoladujących tzw. zintegrowanych systemach opartych na ogniwach słonecznych i magazynach energii typu baterie litowo-jonowe czy superkondensatory [50]. Tego rodzaju koncepcja jest interesująca nie tylko ze względu na zapewnienie magazynowania energii otrzymanej z ogniw słonecznych, ale również daje możliwość posiadania systemu wspomagającego ładowanie z wykorzystaniem energii słonecznej i może być potencjalnie zastosowana w pojazdach napędzanych energią elektryczną. Tego typu rozwiązanie może zapewnić dodatkowy dostęp do energii elektrycznej, zwiększając zasięg pojazdów bez potrzeby ładowania akumulatora z zewnętrznego źródła. W związku z tym baterię litowo-jonową łączono z nieorganicznym ogniwem słonecznym (krzemowym) [85], ogniwem słonecznym barwnikowym (tzw. DSSC) [86], polimerowym ogniwem słonecznym o architekturze objętościowej (ang. *Bulk Heterojunction*, BHJ) [87–89] oraz ogniwem perowskitowym [90], uzyskując wydajność $PCE_{\text{przemiany}} = 15\%$, $PCE_{\text{magazynowania}} = 97\%$ i $PCE = 14,5\%$ dla ogniwa krzemowego, $PCE_{\text{magazynowania}} = 41\%$ i $PCE = 0,82\%$ dla ogniwa barwnikowego oraz $PCE_{\text{przemiany}} = 1,85\%$ dla ogniwa BHJ połączonego z baterią litowo-polimerową i $PCE_{\text{przemiany}} = 5,49\%$ dla ogniwa BHJ połączonego z baterią litowo-jonową, dla ogniwa zaś perowskitowego połączonego z baterią litowo-jonową $PCE_{\text{przemiany}} = 7,8\%$.

Interesującym pomysłem jest rozwiązanie oparte na wykorzystaniu i połączeniu efektów elektroluminescencji i fotowoltaicznego [91]. Ogniwo tandemowe o architekturze ITO/TiO_x/PCDTBT:PC70BM/(PEDOT:PSS): alkohol izopropylowy 1:6/PEDOT:PSS/SY/Ca/Al wykazywało sprawność 3,1% oraz luminancję 8000 cd/m².

Tego typu urządzenie może działać jako ogniwo słoneczne lub sterowana dioda luminescencyjna i może być zastosowane do produkcji parasoli plażowych czy też świecących T-shirtów gromadzących energię słoneczną, np. do zasilania telefonu komórkowego czy przenośnego radia.

7. PÓŁELASTYCZNE PANELE FOTOWOLTAICZNE BAZUJĄCE NA KRZEMIE: PANORAMA PROJEKTU

Projekt pt. „Innowacyjne elastyczne pokrycie fotowoltaiczne” jest realizowany w ramach programu „GEKON-Generator Koncepcji Ekologicznych”. W skład konsorcjum realizującego projekt wchodzi firma LUBAWA S.A. (lider), Wojskowy Instytut Techniki Inżynierskiej im. prof. Józefa Kosackiego, Wrocław (WITI), Instytut Metalurgii i Inżynierii Materiałowej PAN Kraków (IMIM PAN) oraz AK Consulting, Katowice.

W ramach realizacji projektu przewiduje się zaprojektowanie, wykonanie oraz badania przemysłowe elastycznego pokrycia fotowoltaicznego. Podstawową zaletą takiego pokrycia będzie możliwość zwijania (np. na bębnie) i rozwijania na dowolnej powierzchni, łatwa obsługa oraz lekka konstrukcja. Projekt obejmuje zarówno badania laboratoryjne, jak i badania przemysłowe i poligonowe.

Założenia technologii wytwarzania tego typu źródeł zasilania mają stanowić wymierny efekt realizacji projektu. Innowacyjny charakter zaproponowanego źródła zasilania zdeterminowany został przez zastosowanie elastycznego materiału z wbudowanymi ogniwami fotowoltaicznymi o małych wymiarach w postaci mozaiki. Elastyczność całego źródła zasilania będzie wynikała zarówno z właściwości samego materiału podłoża, jak również ze sposobu rozmieszczenia i rodzaju ogniw fotowoltaicznych. Przewiduje się zastosowanie różnych materiałów nośnych oraz różnych konfiguracji ogniw fotowoltaicznych. Wynik realizacji projektu można określić mianem „Systemu zasilania słonecznego” mającym źródło zasilania w formie elastycznego pokrycia fotowoltaicznego, na którym rozmieszczone będą miniogniwa fotowoltaiczne, tworzące wraz z połączeniami skalowaną mozaikę.

Zgodnie z tym, jak założono, pokrycie cechować się będzie nie tylko znaczną elastycznością umożliwiającą jego rolowanie, ale co jest również bardzo istotne z punktu widzenia przyszłych użytkowników, możliwością odcięcia zadanej długości maty bez utraty właściwości elektrycznych. Kompletny „System zasilania słonecznego” zostanie wyposażony w akumulatory oraz układy elektroniczne do zarządzania energią. Moc znamionowa wynosić będzie do kilkuset watów z możliwością rozbudowy. Prze-

znaczeniem systemu opartego na takim źródle zasilania jest praca w obszarach dotkniętych skutkami katastrof naturalnych (powódzie, tornada, silne opady śniegu) oraz nienaturalnych (katastrofy budowlane, przemysłowe).

W ramach projektu zakłada się badanie opcjonalnych elementów umożliwiających rozwinięcie źródła zasilania nad powierzchnią ziemi (forma zadaszenia) lub w obrębie obiektów dotkliwie zniszczonych (przykładowo tereny zalane podczas powodzi). Dodatkowo prowadzone będą badania przemysłowe nad skalowalnością zaproponowanych rozwiązań, tak aby możliwe było wytworzenie baterii o różnych wymiarach.

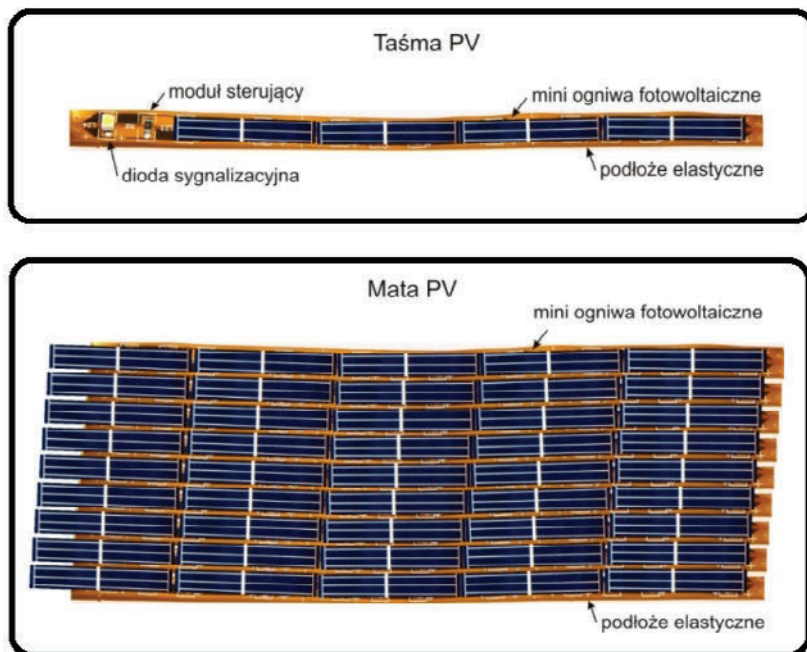
Podczas realizacji projektu zostaną opracowane i wytworzone struktury krzemowych ogniw fotowoltaicznych o zadanych właściwościach elektrycznych. W związku z tym zostanie opracowana technologia wytwarzania ogniw o dowolnych wymiarach, z odpowiednią konfiguracją elektrod. Kolejnym zadaniem będzie dobór materiału na podłoża ogniw i określenie jego właściwości mechanicznych. Finalnym efektem projektu będzie opracowanie technologii montażu ogniw na elastycznym podłożu oraz optymalizacja parametrów wyjściowych przez analizę i dobór odpowiednich elementów wykonawczych, określenie i optymalizacja właściwości użytkowych.

Ponadto projekt obejmuje również prace związane z magazynowaniem energii, a w szczególności dotyczące:

- opracowania systemu zarządzania energią,
- wytworzenia dedykowanego magazynu energii dla elastycznego pokrycia fotowoltaicznego.

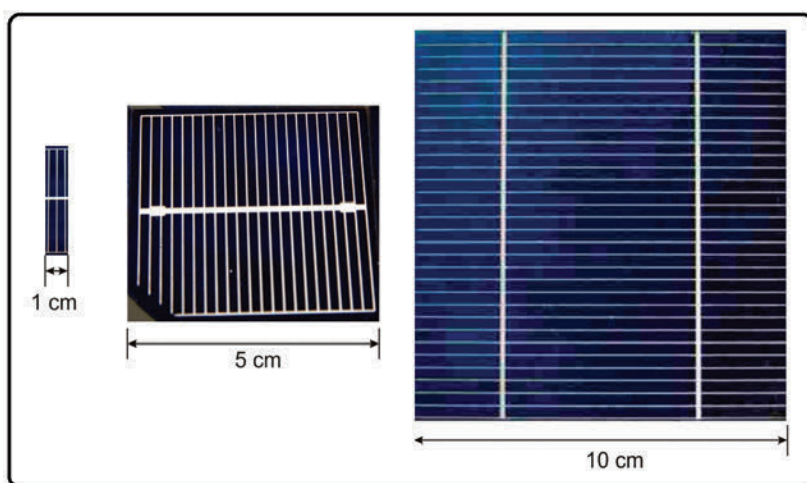
W Wojskowym Instytucie Techniki Inżynierskiej we Wrocławiu w celu realizacji projektu w pierwszym etapie prowadzonych prac badawczych zaproponowano wytworzenie dwóch demonstratorów ogniw słonecznych, które mają charakteryzować się elastycznością i stosunkowo dużą wydajnością (rys. 7). Pierwszy demonstrator to quasi-elastyczna bateria w formie maty fotowoltaicznej, na której rozmieszczone będą miniogniwa fotowoltaiczne tworzące wraz z połączeniem swego rodzaju mozaikę. Drugi demonstrator to elastyczna taśma z rozmieszczonymi miniogniwami, akumulatorami, układem sterującym, w skład której może dodatkowo wchodzić sygnalizacyjna dioda LED [92]. Zastosowanie periodycznego ułożenia elementów umożliwi wykorzystanie pokrycia o dowolnej długości (z określonych zakresów długości).

Jak omówiono wcześniej, obecnie w komercyjnych zastosowaniach dominują krzemowe ogniwa krystaliczne zaliczane do I generacji. W ostatnich latach nastąpił intensywny rozwój nowych typów ogniw wśród nich cienkowarstwowych oraz polimerowych. Zaletą ogniw polimerowych oraz niektórych rozwiązań cienkowarstwowych jest ich elastyczność, a także mniejsza masa. Niestety sprawność oraz trwałość takich ogniw jest wciąż niższa w stosunku do standardowych ogniw krzemowych. Dążenie do wytworzenia formy pośredniej cechującej się zarówno właściwościami elastycznymi, jak i wydajnością na wysokim poziomie przyczyniła się do stworzenia proponowanej koncepcji wykorzystującej ogniwa I generacji.



Rys. 7. Przykładowy wygląd demonstratora technologii w postaci półelastycznej taśmy oraz półelastycznej maty fotowoltaicznej [92]

Fig. 7. The technology demonstrator example as a form of semi-flexible strip and semi-flexible photovoltaic mat [92]

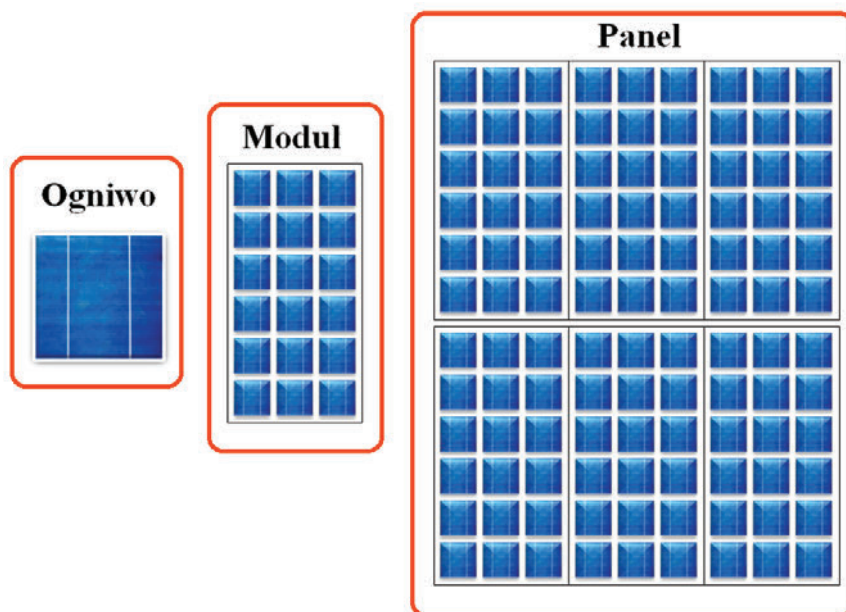


Rys. 8. Przykładowe ogniwa fotowoltaiczne wykonywane w laboratorium IMIM PAN [92]

Fig. 8. Examples of silicon solar cells constructed in IMIM PAN [92]

Ogniwo fotowoltaiczne składa się z szerokiego obszaru typu p, zwanego bazą, cienkiej warstwy typu n, zwanej emiterem, jednowarstwowej lub wielowarstwowej powłoki przeciwoodbiciowej oraz kontaktów metalowych na górnej i dolnej powierzchni. Dolny kontakt pokrywa zazwyczaj całą powierzchnię. Kontakt górny wykonywany jest w formie siatki zakrywającej kilka procent całej powierzchni.

We wstępnych analizach i badaniach wykonanych w WITI wykorzystano wyprodukowane w IMIM PAN ogniwa o wymiarach 5×5 cm oraz 10×10 cm (rys. 8). Celem było otrzymanie ogniw o jak najmniejszych wymiarach, optymalnie 5×5 cm, z możliwością cięcia na mniejsze 1×5 cm lub 1×2 cm (rys. 8). Zastosowanie mniejszych ogniw umożliwia zginanie maty (taśmy) oraz cięcie jej na mniejsze elementy [92]. Ogniwa będą łączone w moduły, a te z kolei w panele, jak schematycznie przedstawiono na rys. 9 [92–94].



Rys. 9. Schematyczna budowa ogniwa, modułu i panelu fotowoltaicznego [92]

Fig. 9. Scheme of single solar cell, module and photovoltaic panel [92]

Cięcie, czyli pokonanie spójności materiału w ogniwach fotowoltaicznych, jest to skomplikowany proces obejmujący podział struktury z obszarami o odmiennym typie przewodnictwa oraz elektrodami metalowymi na mniejsze fragmenty. Można ciąć płytki krzemowe przed wykonaniem elektrod albo gotowe ogniwa wraz z elektrodami [95].

Do badań wybrano ogniwa fotowoltaiczne na bazie krzemu polikrystalicznego. Ogniwa miały standardowe elektrody połączeniowe. Koncepcja zakładała w tym

przypadku wytworzenie elastycznej taśmy na bazie ogniw o rozmiarach $2,5 \times 2,5$ cm. Za metodę cięcia zaproponowano technikę laserową. Zastosowanie lasera ma tę zaletę, że jest to bardzo wydajna technika cięcia krzemu. Wadą jest stosunkowo duży koszt urządzenia o pożądanej wydajności i parametrach oraz oddziaływanie energetyczne promieniowania laserowego w obszarze złącza jak również w miejscu, gdzie wiązka przecina elektrodę metaliczną. Alternatywą było zastosowanie precyzyjnej piły diamentowej firmy LeadPoint. W urządzeniu tym elementem tnącym są tarcze z nasypem diamentowym.

Ogniwa krzemowe pocięto w IMIM PAN na miniogniwa o rozmiarach $2,5 \times 2,5$ cm. Krawędzie pociętych ogniw badano z użyciem mikroskopu SEM. Widoczna szczelina, która powstaje w wyniku cięcia, ma szerokość $120 \mu\text{m}$ oraz bardzo regularny kształt. Na przekroju poprzecznym krawędzi ogniwa po cięciu widać niewielkie ślady warstw metalicznych, z których wykonano metalizację. Możliwość kontroli głębokości cięcia piłą diamentową umożliwia przełamywanie ogniwa po cięciu, tak aby tarcza nie miała styku z obszarem emitera i elektrodą przednią [95]. Dla różnych miniogniw wyciętych z jednego większego ogniwa przeprowadzono także w IMIM PAN badania obrazowania elektroluminescencyjnego, uwidaczniające degradację części ścieżki głównej, wynikającą z uszkodzeń elektrod powstałych podczas procesu cięcia [95].

Koncepcje wykonania kontaktów metalowych łączących ogniwa przedstawiono na rysunku 10 [92, 93]. Wybór sposobu wykonania kontaktów metalowych jest bardzo istotny, ponieważ wpływa nie tylko na właściwości mechaniczne otrzymanego pokrycia fotowoltaicznego, ale ma bardzo istotne znaczenie w procesie technologicznym zastosowanym w produkcji seryjnej. W przypadku realizacji pierwszej koncepcji zostanie także opracowana metoda wykonania połączeń między układem kontaktów metalicznych a miniogniwami. Rozważa się wykorzystanie klejów przewodzących bądź klasycznych technik lutowania powierzchniowego.

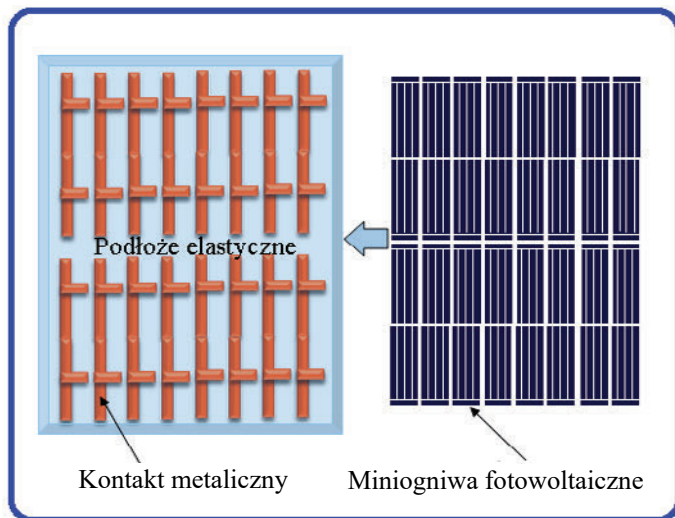
Moduły fotowoltaiczne mogą być wykonywane na różnych podłożach modułu:

- na szkle,
- na warstwie metalu,
- na warstwie elastycznej z tworzywa sztucznego,
- na tekstyliach.

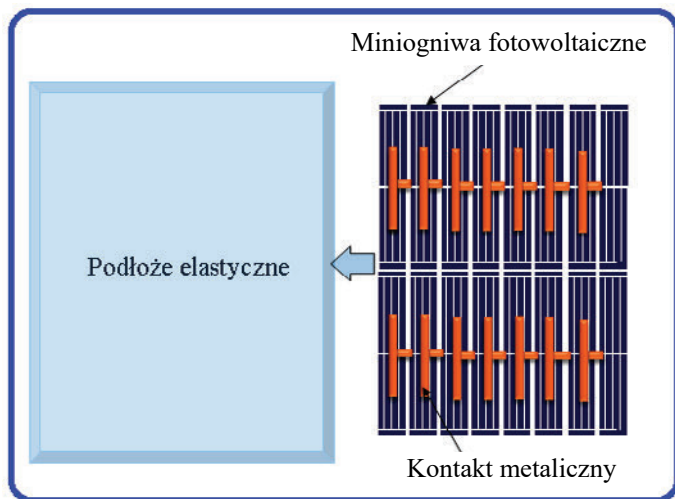
W przypadku koncepcji elastycznego pokrycia fotowoltaicznego spośród przedstawionych materiałów możliwe do zastosowania są elastyczne warstwy z tworzyw sztucznych oraz tekstylia.

Za warstwę ochronną do hermetyzowania ogniw fotowoltaicznych w procesie laminowania wykorzystano kopolimer EVA (rys. 11), a za podłoże Tedlar[®]. Kopolimer EVA wytwarzany jest w postaci cienkiej folii grubości kilkuset mikrometrów. Chroni ogniwo fotowoltaiczne przed szkodliwym oddziaływaniem atmosferycznym, m.in. wilgocią, oraz zabezpiecza powierzchnię ogniwa i kontaktów przed utlenieniem. Kopolimer EVA pokrywa przednią powierzchnię ogniw i ma znacznie więk-

szą transparentność od Tedlaru, który stosowany jest jako pokrycie tylne i jest nieprzezroczysty.



(a)



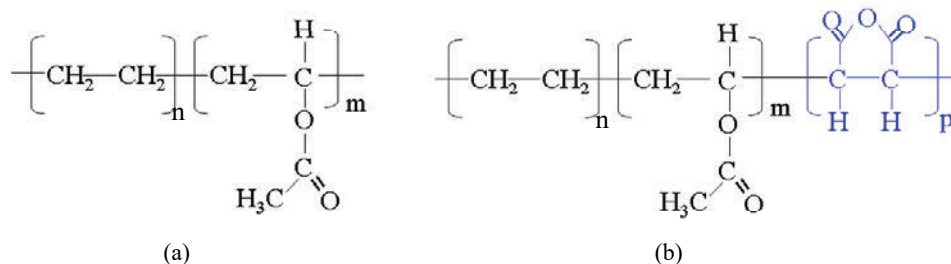
(b)

Rys. 10. Dwie koncepcje wykonania kontaktów metalowych łączących ogniwa:

- a) kontakty metalowe zintegrowane z warstwą elastyczną,
- b) kontakty metalowe zintegrowane z miniogniwami [92, 93]

Fig. 10. Two concepts of implementation of the metal contacts for cells connection:

- a) the metal contacts integrated with the elastic layer,
- b) the metal contacts integrated with the mini-cells [92, 93]

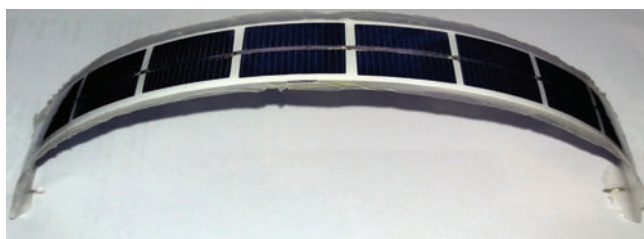


Rys. 11. Struktura chemiczna kopolimeru EVA: (a) kopolimer etylenu z octanem winylu EVATANE[®],
 (b) termo-polimer etylenu z octanem winylu i bezwodnikiem maleinowym OREVAC[®]
 Fig. 11. Chemical structures of EVA copolymers

Kolejnym etapem wykonanych prac doświadczalnych jest proces łączenia szeregowego oraz proces laminacji [96]. Ogniwa połączone w szeregi o różnej liczbie ogniw przy czym najdłuższy wykonany podczas badań moduł składał się z 12 ogniw o wymiarach $2,5 \times 2,5$ cm. Taki układ umożliwił już ocenę elastyczności wykonanej taśmy oraz przeprowadzenie dalszej oceny parametrów mechanicznych ogniw. Ze względu na to, iż ogniwa będą pracowały w układzie, który ma zapewnić taką elastyczność, aby możliwe było nawijanie wykonanej taśmy na bęben o zadanym promieniu, zaproponowano dwie koncepcje układu warstwowego podczas procesu laminacji.



Rys. 12. Półelastyczna taśma fotowoltaiczna po procesie laminacji w układzie konwencjonalnym [96]
 Fig. 12. Semi-flexible photovoltaic tape in a conventional arrangement obtained by the lamination process [96]



Rys. 13. Półelastyczna taśma fotowoltaiczna poddana procesowi wygięcia [96]
 Fig. 13. Semi-flexible photovoltaic tape undergone a bending process [96]

W pierwszym przypadku układ był typowy, mianowicie ogniwo znajdowało się między dwiema warstwami najczęściej używanego materiału hermetyzującego, jakim

jest polimer EVA, natomiast tylną i przednią warstwę zabezpieczającą stanowiły odpowiednio Tedlar i przezroczysta folia dominacji. Tak wykonany fragment elastycznej taśmy fotowoltaicznej przedstawiono na rysunku 12. Taśma ta została poddana procesowi wielokrotnego wyginania (promień gięcia ok. 10 cm; rys. 13) w celu sprawdzenia wytrzymałości mechanicznej i zaobserwowania ewentualnych pęknięć.

Po procesie wielokrotnego gięcia nie zaobserwowano pęknięć ogniw fotowoltaicznych widocznych nieuzbrojonym okiem, szczegółową ocenę przeprowadzono z wykorzystaniem technik fotoluminescencji i elektroluminescencji. W drugim przypadku – aby dodatkowo wzmocnić ogniwa fotowoltaiczne – zastosowano podobny układ warstwowy z tą różnicą, że pod każdym ogniwem umieszczono dodatkowe nieelastyczne podkładki z Tedlaru oraz laminatu epoksydowo-szklanego [96]. Tak wykonane fragmenty taśm fotowoltaicznych przedstawiono na rysunku 14. W tym przypadku zaobserwowano wyraźne pęknięcia, do których doszło podczas procesu laminacji. Prawdopodobną przyczyną było niedopasowanie podkładek pod względem wielkości do ogniw oraz niedostateczny odstęp pomiędzy łączonymi ogniwami. Wielokrotne wyginanie ogniw w takim układzie nie doprowadziło do nowych pęknięć.



Rys. 14. Półelastyczna taśma fotowoltaiczna po procesie laminacji w układzie z dodatkowymi podkładkami pod ogniwa [96]

Fig. 14. Semi-flexible photovoltaic tape after the lamination process with additional pads for the cell [96]

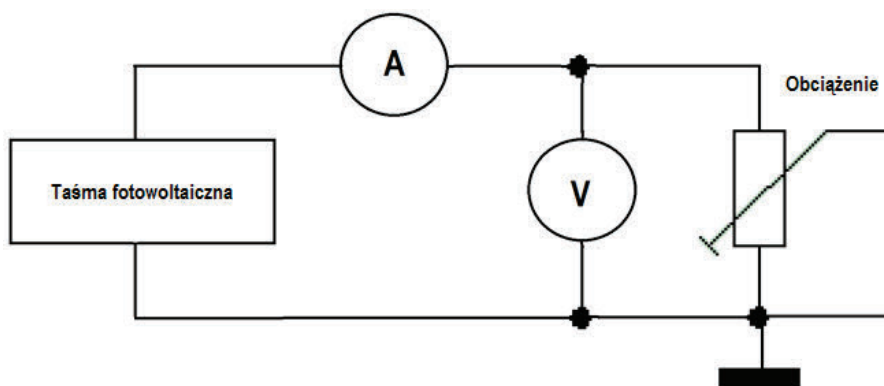
Aby właściwie ocenić poziom degradacji mechanicznej ogniw oraz wykryć mikro-pęknięcia, których nie widać nieuzbrojonym okiem, zastosowano nowoczesną technikę obrazowania, jaką jest fotoluminescencja (PL) i elektroluminescencja (EL). Badania PL i EL wykonano w IMIM PAN [97]. Technika ta jest coraz częściej stosowana w fotowoltaice do badania defektów ogniw i modułów fotowoltaicznych. Obraz PL i EL zawiera np. informację o rozkładzie na powierzchni płytki efektywnego czasu życia nośników mniejszościowych w warunkach pracy ogniwa. Metoda ułatwia także ujawnienie mikro-pęknięć oraz obszarów nieaktywnych w obszarze pojedynczego ogniwa (PL) i nieaktywnych pod kątem obwodu zewnętrznego (EL). W obu przypadkach zaobserwowano obszary nieaktywne elektrycznie oraz mikro-pęknięcia powstałe podczas procesów laminacji oraz zginania. Do zwarcia doszło prawdopodobnie z powodu zbyt małej odległości między ogniwami oraz zbyt długiej taśmy połączeniowej na froncie ogniwa (biegun ujemny), która w wyniku laminacji została zwarta z taśmą na spodzie ogniwa.

Badania parametrów elektrycznych taśmy fotowoltaicznej wykonano w laboratorium w WITI z wykorzystaniem sztucznego symulatora promieniowania słonecznego, tzw. Solarboxu (rys. 15). Podczas badań taśmę fotowoltaiczną umieszczono na ruchomym stole pomiarowym i poprzez zmianę odległości od źródła światła ustalono natężenie promieniowania na poziomie 1000 W/m^2 . Do badań przeznaczono taśmę fotowoltaiczną wykonaną w IMIM PAN, która nie była poddawana narażeniom mechanicznym, a wykonane badania elektroluminescencyjne (obrazowanie elektroluminescencyjne) nie wykazywały wad. Ze względu na małą moc elektryczną badanej taśmy fotowoltaicznej nie można było zastosować komercyjnego obciążenia. Zastosowano więc prosty układ przedstawiony na rys. 16. Układ zbudowany był z regulo-



Rys. 15. Symulator promieniowania słonecznego – SOLARBOX w WITI

Fig. 15. Solar simulator – SOLARBOX in WITI

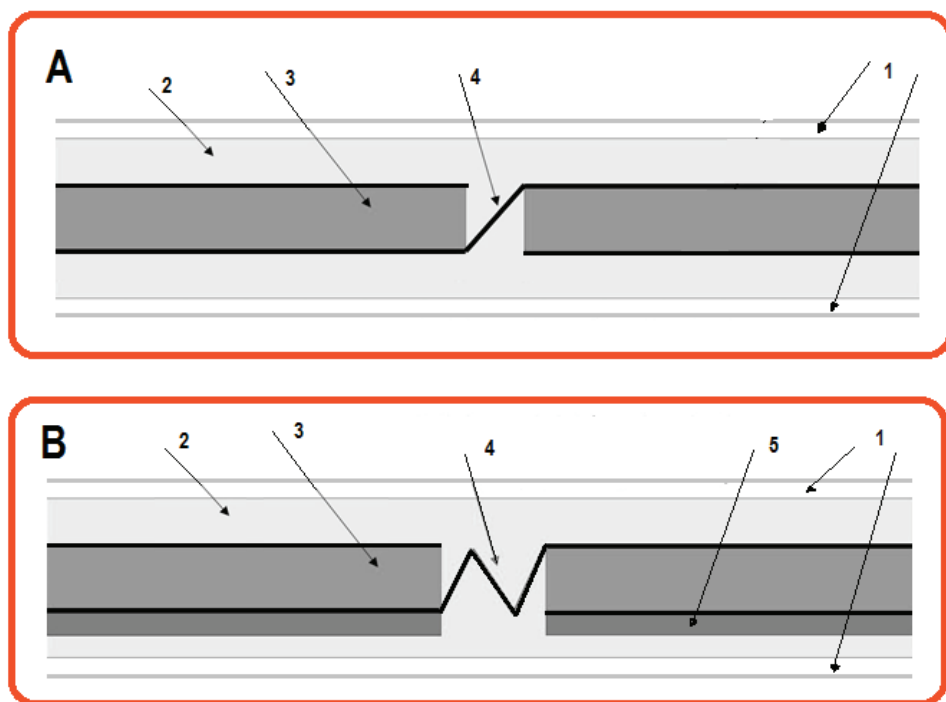


Rys. 16. Układ pomiaru mocy zastosowany do badania taśmy fotowoltaicznej

Fig. 16. System to measure power of the photovoltaic strips

wanego rezystora oraz woltomierza i amperomierza. W trakcie badania regulowano tak wartość rezystancji, aby otrzymać jak największą moc prądu elektrycznego z taśmy fotowoltaicznej. Po odczytaniu wyników pomiarowych obliczono sprawność przetwarzania energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną (PCE) na poziomie 11%, co jest satysfakcjonujące dla przyjętego rozwiązania konstrukcyjnego taśmy fotowoltaicznej.

Ze względu na fakt, że taśma fotowoltaiczna powinna wykazywać znaczną elastyczność, zaproponowano nowy sposób dodatkowego zabezpieczenia ogniów oraz ich łączenia. Oprócz zastosowania dodatkowych wzmacniających podkładek pod ogniwa fotowoltaiczne, zaproponowano wykonanie większych przerw pomiędzy ogniwami oraz takie przygotowanie pasków połączeniowych, aby podczas wyginania nie naciskały na krawędzie ogniwa. Uzyskuje się to przez wykonanie dodatkowych zagięć w paskach w miejscach zwiększonych przerw pomiędzy ogniwami. Istotę rozwiązania przedstawiono na rysunku 17.



Rys. 17. Budowa elastycznej fotowoltaicznej taśmy: A – układ typowy, B – układ zmodyfikowany, gdzie: 1 – folia zabezpieczająca, 2 – folia hermetyzująca EVA, 3 – ogniwo fotowoltaiczne, 4 – taśma połączeniowa, 5 – dodatkowa podkładka

Fig. 17. Construction of flexible photovoltaic tape: A – a typical arrangement, B – a modified system, where: 1 – the protective foil, 2 – foil sealing EVA, 3 – photovoltaic cell, 4 – Connection tape, 5 – the additional pad

Korzystne w proponowanym rozwiązaniu są:

1. Zwiększona wytrzymałość mechaniczna ogniwa fotowoltaicznego ze względu na zastosowanie podkładek wzmacniających.
2. Ulepszona elastyczność ze względu na zwiększenie odstępów między ogniwami fotowoltaicznymi.
3. Lepsza wytrzymałość taśmy na zginanie ze względu na wykonanie dodatkowych zagięć na paskach taśmy połączeniowej w miejscach zwiększonych przerw pomiędzy ogniwami.

Przeprowadzone badania pokazały, iż możliwe jest cięcie za pomocą piły mechanicznej dużych ogniw na mniejsze, bez widocznego spadku ich wydajności. Istotny jest fakt, że dotyczy to ogniw, których elektrody nie są specjalnie zaprojektowane do tego celu. Pokazano, iż zastosowanie klasycznego układu laminacji daje pożądane efekty, przy czym należy zwrócić szczególną uwagę na mikropęknięcia, które mogą wystąpić na tym etapie. Podczas procesu laminacji okazało się, że stosowanie podkładek pod ogniwa wymaga dalszych prac badawczych. Metoda obrazowania fotoluminescencyjnego i elektroluminescencyjnego doskonale sprawdza się podczas diagnozowania defektów, które powstają w trakcie cięcia, łączenia czy laminacji ogniw fotowoltaicznych dlatego też jest konieczna zarówno na etapie badań, jak i kontroli produkcji. Planuje się, że ogniwa będą cięte na jeszcze mniejsze fragmenty. Właściwy rozmiar zostanie wybrany po testach mechanicznych, mających na celu zbadanie wytrzymałości gotowego układu półelastycznego. Konieczne będzie określenie minimalnego promienia, jaki może mieć bęben, na który nawijane będą elastyczne taśmy lub pokrycia fotowoltaiczne.

Przewiduje się, że powstałe w wyniku projektu elastyczne pokrycia fotowoltaiczne mogą być zastosowane jako awaryjne lub stałe źródło energii elektrycznej w sytuacjach braku dostępu do sieci energetycznej i klęsk żywiołowych, co oznacza, że będą one zastępowały przede wszystkim zespoły prądotwórcze oraz systemy akumulatorowe.

8. GOTOWE WYROBY NA BAZIE OGNIW SŁONECZNYCH, OPRACOWANE W WITI

W Wojskowym Instytucie Techniki Inżynierskiej we Wrocławiu (WITI) prowadzone są od wielu lat badania pod kątem możliwości zastosowania bądź ogniw, bądź modułów fotowoltaicznych na potrzeby wojska. W WITI na przestrzeni ostatniej dekady opracowano wiele demonstratorów, wśród których należy szczególnie wyróżnić:

- system zasilający środki sygnalizacyjne [98],
- system zasilający pojedynczego żołnierza [98],
- system zasilający bojowe środki [98],
- system zasilający bezobsługową kamerę [98],

- przewoźny system zasilania dla wozów dowodzenia [98],
- autonomiczny system zasilania, tzw. polowa elektrownia słoneczna [98],
- system zasilający filtry klasy K1-K2 do oczyszczania wody [99, 100].

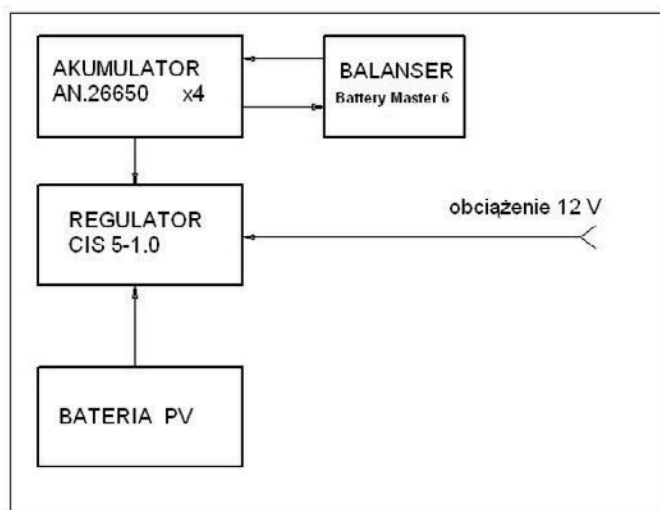
System zasilający środki sygnalizacyjne, demonstrujący wykorzystanie panelu fotowoltaicznego w urządzeniu do oznakowania terenu niebezpiecznego lub strzeżonego, został wykonany w postaci tablicy informacyjnej ze znakami ostrzegawczymi widocznymi w ciemności (rys. 18). Tablica informacyjna jest podświetlana diodami LED. Zastosowane rozwiązanie spowodowało konieczność skonstruowania oszczędnego systemu zasilania oraz uzupełnienia akumulatorów z baterii słonecznej. Zrealizowano to dzięki zastosowaniu wysokosprawnego sterownika diod LED oraz systemu ładowania i detekcji natężenia oświetlenia zewnętrznego.

Ponieważ przewidziana jest dowolna lokalizacja urządzenia w terenie, stworzono możliwość regulacji położenia baterii fotowoltaicznej względem słońca. Konstrukcja taka umożliwia długotrwałą pracę w terenie bez potrzeby wymiany akumulatorów. Inicjacja nowoczesnych środków bojowych wymusza obecnie dostarczenie odpowiedniej ilości energii elektrycznej, która jest pobierana z akumulatorów. Niestety zdarzają się sytuacje, w których następuje rozładowanie akumulatora i nie ma możliwości szybkiej jego wymiany bądź naładowania, dlatego wytworzono urządzenie składające się z akumulatorów zapewniających napięcie nominalne 13,2 V i ogniwa fotowoltaicznego wraz z układem regulacji ładowania. Wyrób pełni funkcję przenośnego, uniwersalnego i awaryjnego źródła zasilania środków bojowych i nie tylko (rys. 19).



Rys. 18. Demonstrator systemu zasilania środków sygnalizacyjnych z zastosowaniem panelu fotowoltaicznego

Fig. 18. Demonstrator of signals' power system using a photovoltaic panel

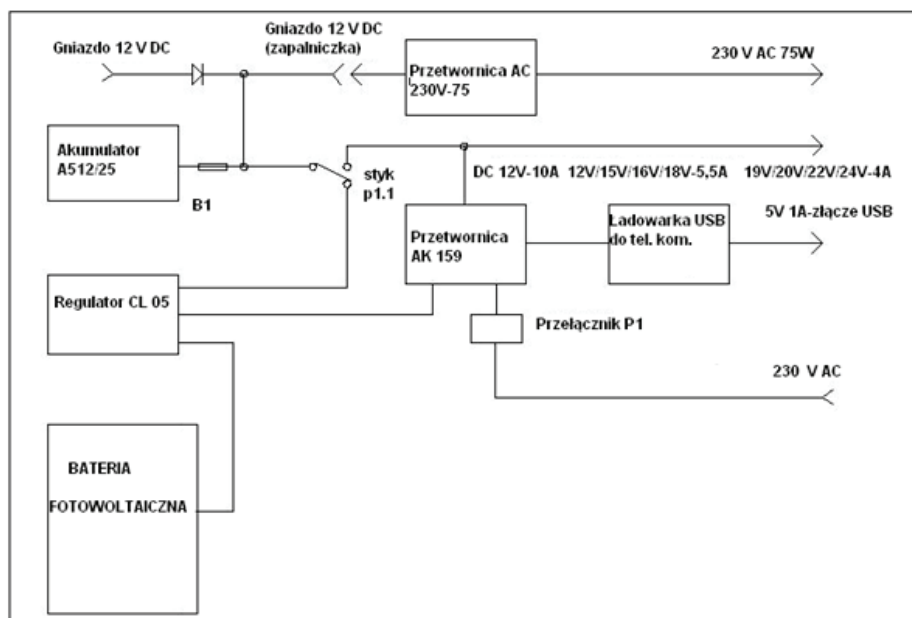


Rys. 19. Widok demonstratora systemu zasilania środków bojowych wraz z schematem blokowym

Fig. 19. A demonstrator of power supply systems of combat equipment and a block diagram

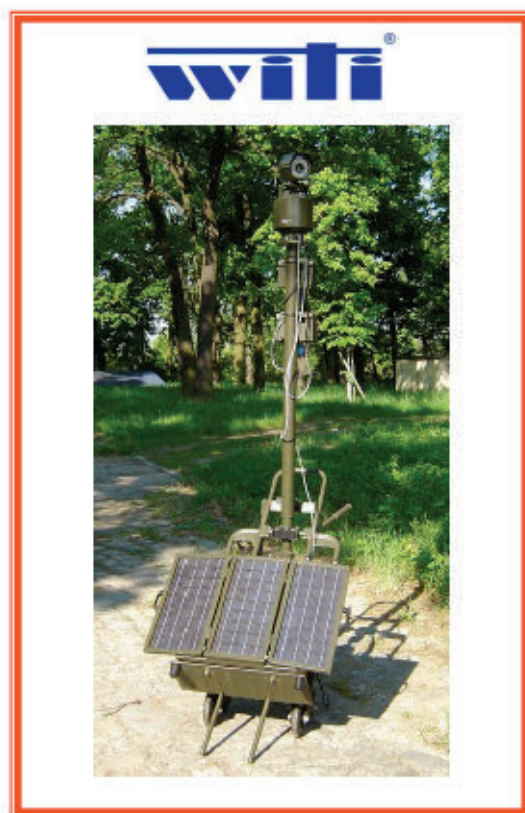
Z kolei system zasilający pojedynczego żołnierza to kolejne urządzenie pełniące funkcję awaryjnego źródła zasilania oparte na rozkładanym ogniwie słonecznym (rys. 20). Urządzenie to stanowi rezerwowe źródło zasilania komputerów przenośnych, telefonów komórkowych i innych mobilnych urządzeń będących na wyposażeniu

niu żołnierza. Problem różnych napięć zasilania tych urządzeń rozwiązany został przez zastosowanie odpowiedniej elektroniki i wyposażenie urządzenia w rozmaite złącza. Żołnierz może przełączać wartość napięcia wyjściowego i wybrać odpowiednie złącze do swojego urządzenia. Ze względu na to, iż energia słoneczna nie zawsze jest dostępna, akumulator można doładować również z akumulatora samochodowego przez wtyk zapalniczki lub ze źródła napięcia przemiennego 230 V.

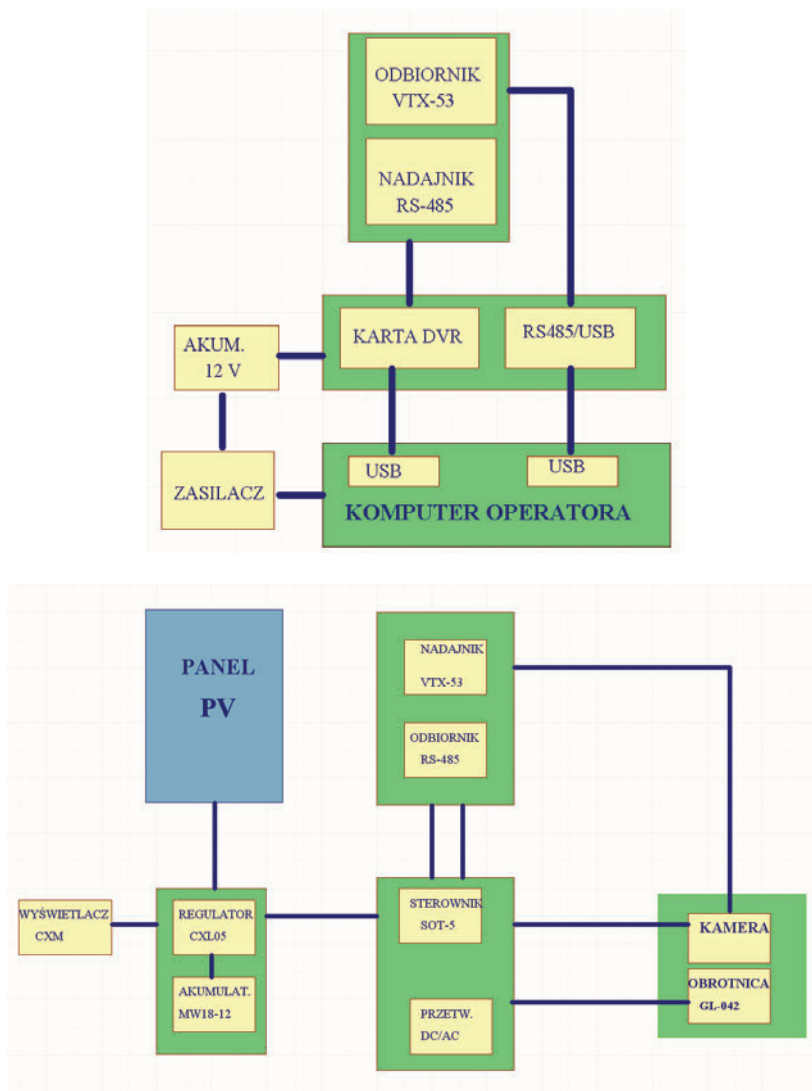


Rys. 20. Widok demonstratora systemu zasilania pojedynczego żołnierza oraz schemat blokowy
 Fig. 20. Demonstrator of power supply system for a single soldier and flowchart

Kolejnym urządzeniem jest system zasilania kamery bezobsługowej umożliwiający wytworzenie autonomicznego zestawu stanowiska obserwacyjnego, pracującego nieprzerwanie w terenie, w którym nie ma możliwości wykorzystania zasilania z zewnętrznej sieci elektrycznej 230 V lub pokładowej 24 V. Zestaw składa się ze stanowiska kamery i obserwatora (rys. 21, 22). Stanowisko kamery stanowi wózek z zamontowaną skrzynią transportową, rozkładaną baterią fotowoltaiczną oraz kamerą z masztem. Komunikacja ze stanowiskiem operatora realizowana jest przez moduły radiowe umieszczone na maszcie. Na czas transportu lub przechowywania kamera z obrotnicą i osprzętem są demontowane i umieszczane w skrzyni transportowej, w której znajdują się ponadto dwa akumulatory doładowywane z baterii słonecznej oraz układy regulatorów i zabezpieczeń. Bateria fotowoltaiczna umieszczona na skrzyni transportowej zbudowana jest z 3 sekcji 36 ogniw fotowoltaicznych wykonanych z krzemu monokrystalicznego o wymiarach 5×5 cm. Zapewnia ona dodatni bilans mocy dostarczanej z baterii fotowoltaicznych i pobieranej przez obciążenie.



Rys. 21. Zestaw kamery obserwacyjnej
Fig. 21. A camera observation set



Rys. 22. Schematy blokowe stanowisk kamery i operatora
 Fig. 22. Flowcharts of a camera and an operator positions

Przewoźny system zasilania dla wozów dowodzenia składa się z rozkładanego panelu fotowoltaicznego wyposażonego w dwie baterie słoneczne o całkowitej mocy około 100 W. Panel fotowoltaiczny wyposażony jest w regulator umożliwiający bezpośrednie podłączenie go do sieci pokładowej zasilanych pojazdów (24 V). Metalowa rozkładana obudowa zapewnia właściwą ochronę przed czynnikami środowiskowymi oraz umożliwia właściwe ustawienie baterii względem słońca (rys. 23).



Rys. 23. Panel fotowoltaiczny przewoźnego systemu zasilania
Fig. 23. Photovoltaic panel of the transportable power system



Rys. 24. Widok wybranych elementów polowej elektrowni fotowoltaicznej
Fig. 24. Mobile photovoltaic power plant, view of selected items

Polowa elektrownia słoneczna jako autonomiczny system zasilania jest urządzeniem przeznaczonym do wytworzenia energii elektrycznej o napięciu 230 V i częstotliwości 50 Hz. Skonstruowana polowa elektrownia składa się z 10 baterii fotowoltaicznych o mocy 100 W każda, baterii akumulatorów oraz z układu prądotwórczego (rys. 24). Odporność na narażenia mechaniczne i środowiskowe zapewnia profesjonalna konstrukcja wykonana według militarnych standardów. Umożliwia to szerokie ich stosowanie w wielu niekorzystnych warunkach terenowych i środowiskowych.

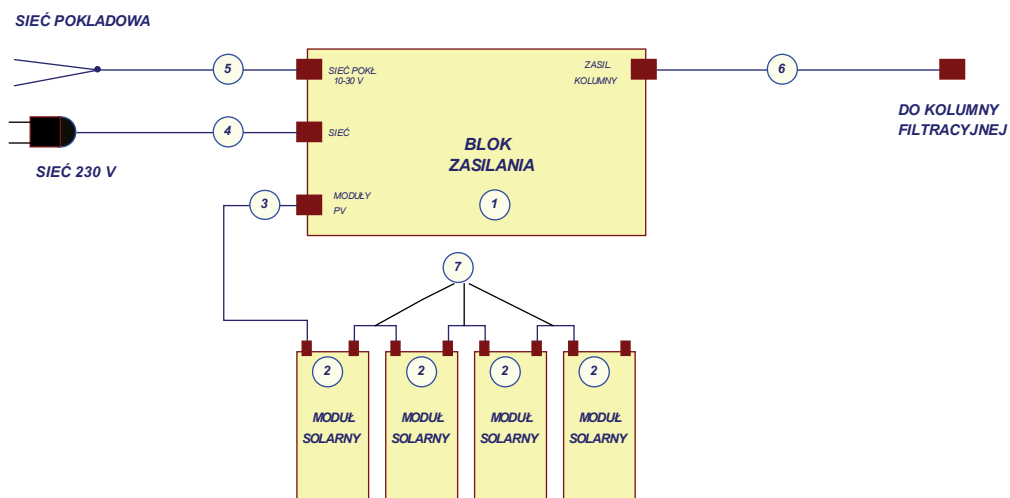
Moduły fotowoltaiczne bazują na ogniwach słonecznych opartych na krzemie monokrystalicznym o sprawności $PCE = 14,65\%$, współczynnika wypełnienia $FF = 0,76$, prądzie zwarcia $I_{sc} = 3,186$ mA i napięciu obwodu otwartego $V_{oc} = 0,599$ mV. Specjalnie wykonany dla elektrowni zespół prądotwórczy jest źródłem energii elektrycznej w przypadku braku światła słonecznego i rozładowania się akumulatorów systemu. Przetwarzanie i gromadzenie energii realizowane jest przez falownik i inwerter zamontowany w przedziale transportowym przyczepy. Falownik jest urządzeniem bezobsługowym. Działa automatycznie po pojawieniu się napięcia z modułów fotowoltaicznych na poziomie nie mniejszym niż 280 V. Falownik i inwerter współpracują ze sobą w taki sposób, aby, wytwarzając napięcie wyjściowe, wykorzystać maksymalną moc dostarczaną przez moduły. W zależności od mocy dostarczanej przez moduły fotowoltaiczne do systemu następuje ładowanie akumulatora bądź pobieranie z niego energii. Ponadto w zależności od źródła, z którego jest dostarczana energia, inwerter decyduje o wielkości prądu ładowania baterii, wielkości oddawanej mocy oraz kontroluje parametry całego systemu.



Rys. 25. Widok filtru do oczyszczania wody wyposażonego w panel fotowoltaiczny [99, 100]

Fig. 25. The water purification filter powered by a photovoltaic panel [99, 100]

Skonstruowano także system zasilający filtry klasy K1-K2 do oczyszczania wody oparty na panelu fotowoltaicznym (rys. 25, 26). System zasilania filtru składa się z bloku zasilania, zestawu modułów fotowoltaicznych (4 sztuki) oraz kabli modułów fotowoltaicznych do zasilania z zewnętrznego akumulatora lub sieci pokładowej oraz kołka uziomu wraz z linką uziemiającą. Blok zasilania jest wykonany w postaci metalowej skrzynki, w której zabudowano akumulator LiFePO₄-12V/40Ah o relatywnie małej masie w stosunku do pojemności oraz zestaw przetwornic umożliwiających jego ładowanie i wytwarzanie napięć niezbędnych do pracy kolumny filtracyjnej.



Rys. 26. Schemat blokowy systemu zasilania filtru do oczyszczania wody wyposażony w moduł fotowoltaiczny [99, 100]

Fig. 26. A block diagram of the power supply system for water purification filter powered by photovoltaic module [99, 100]

9. WNIOSKI I PERSPEKTYWY ROZWOJU

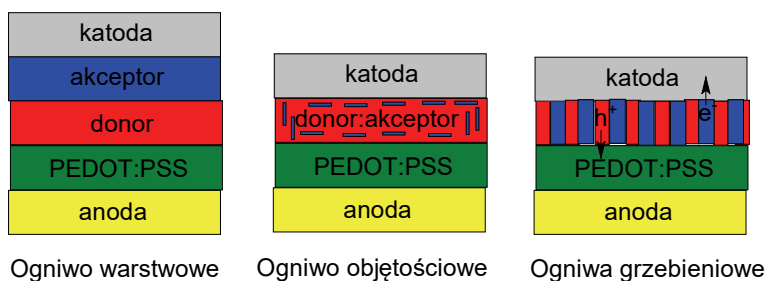
Na podstawie dokonanego przeglądu literaturowego dotyczącego ogniów słonecznych, obejmującego zarówno analizę badań obcych, jak i własnych, można z pełną świadomością stwierdzić, iż obecne rozwiązania praktyczne są zadowalające dla zastosowań cywilnych i wojskowych, aczkolwiek nie są pozbawione wad. Podstawową wadą wszystkich generacji ogniów słonecznych jest spadek sprawności podczas przechodzenia ze skali laboratoryjnej do zastosowań komercyjnych (tab. 1) [6].

Tabela 1. PCE wybranych ogniw słonecznych wraz z przechodzeniem ze skali laboratoryjnej do zastosowań komercyjnych

Table 1. PCE values of selected solar cells received in laboratory and in commercial application

Ogniwo słoneczne	PCE_{max} w zastosowaniach komercyjnych [%]	PCE_{max} w skali laboratoryjnej [%]
Organiczne	8–9	13,2
Perowskitowe	10–12,5	20
GaAs	28,8	31,6
CIGS	10–14	22,3
CdTe	10–12	21
Si amorficzny	6–8	11–12
Si monokrystaliczny	17	26
Si polikrystaliczny	11–16	21

Podsumowując należy podkreślić pomysłowość naukowców w wytwarzaniu organicznych ogniw słonecznych o różnorodnej architekturze, od warstwowej przez objętościową do przyszłościowej i najbardziej perspektywicznej architektury grzebieniowej, konstruowanej w związku ze zmniejszeniem (bądź likwidacją) rekombinacyjnych centrów przez tworzenie wydzielonych ścieżek dla transportu dziur i elektronów, jak schematycznie przedstawiono na rys. 27. Ponadto coraz częściej konstruowane są ogniwa wielowarstwowe, co wiąże się z optymalizacją metod wytwarzania poszczególnych warstw w ogniwie i doбором odpowiednich materiałów organicznych i nieorganicznych do efektywnego rozdziału ładunków, a tym samym doboru materiałów o odpowiednich poziomach energetycznych HOMO-LUMO.



Rys. 27. Przykłady architektury organicznych ogniw słonecznych

Fig. 27. Examples of architectures of organic solar cells

Zastosowanie fotowoltaiki jest wielopłaszczyznowe i obejmuje optoelektronikę, mikroelektronikę, informatykę i telekomunikację. Inteligentne sieci energetyczne (ang. *smart grids*) służą do zarządzania energią, a także do kontroli magazynowania i zapotrzebowania na energię. Są one powiązane z tzw. *Internetem rzeczy* i zorientowane na indywidualnego i zbiorowego klienta. Elastyczne organiczne ogniwa słoneczne, produkowane przez firmę Heliatek, są stosowane w instalacjach pilotażowych

zasilających inteligentne systemy chłodnicze czy wentylacyjne. Bardzo interesującym i perspektywicznym jest sektor budowlany, gdzie fotowoltaika zintegrowana z budownictwem odgrywa kluczową rolę. Nadzieje wiąże się tutaj z ogniwami perowskitowymi i barwnikowymi.

Kolejnym sektorem przemysłowym jest szeroko pojęty przemysł chemiczny, gdzie prace nad nowymi metodami produkcji krzemu krystalicznego, tworzenie struktur hybrydowych, mogących przyczynić się do zwiększenia sprawności ogniw, są nadal interesujące dla branży fotowoltaicznej. Jak wykazano w niniejszej pracy, także nowe, stabilne, tanie materiały organiczne do zastosowania w ogniwach trzeciej generacji wraz z tworzeniem hybryd i nowymi metodami enkapsulacji ogniw są wciąż przedmiotem intensywnych badań naukowców. Trywialne nie są również prace nad optymalizacją metod wytwarzania warstw w ogniwie organicznym, gdzie morfologia i procesy elektryczne zachodzące na złączach odgrywają kluczową rolę w otrzymaniu efektywnych ogniw słonecznych.

Motoryzacja jest kolejnym sektorem, gdzie stosuje się ogniwa słoneczne. Elastyczne organiczne ogniwa słoneczne firmy Heliatak, jako elementy zintegrowane z dachami samochodów, umożliwiają regulację temperatury w samochodzie oraz przeciwdziałają rozładowaniu akumulatorów. Przyszłością są samochody, w których w całości nadwozie będzie pokryte ogniwami słonecznymi.

Wymienione zastosowania cywilne ogniw słonecznych są również przedmiotem zainteresowania wojska. Długotrwałe operacje militarne na otwartej przestrzeni niosą ryzyko zaniku zasilania urządzeń wojskowych, uzasadnione jest więc wykorzystanie tego typu alternatywnych źródeł energii. Jak przedstawiono w niniejszej pracy, w WITI konstruowane są urządzenia na bazie ogniw słonecznych jako autonomiczne i bezobsługowe systemy zasilane z akumulatorów. Wykorzystanie ogniw słonecznych daje możliwość ich ładowania, minimalizując konieczność bezpośredniej ingerencji czynnika ludzkiego, a także eliminuje konieczność uruchamiania głośnych zespołów prądowców.

Podsumowując, optymistyczny jest fakt wytwarzania elastycznych ogniw fotowoltaicznych na bazie materiałów organicznych o coraz większych powierzchniach, których prognozowana żywotność (25 lat) jest porównywalna z żywotnością ogniw krzemowych. Mniejsze koszty produkcji i zredukowana ilość toksycznych odpadów czynią elastyczne, organiczne ogniwa słoneczne przyszłościowymi i ekologicznymi wyrobami dla praktycznych zastosowań w różnych gałęziach przemysłu.

LITERATURA

- [1] <https://www.isc.fraunhofer.de/en/front-page>
- [2] JAYAWARDENA K.D.G.I., ROZANSKI L.J., MILLS C.A., BELIATIS M.J., NISMY N.A., SILVA S.R.P., *Inorganics-in-organics: recent developments and outlook for 4G polymer solar cells*, Nanoscale, 5, 8411–8427, 2013.
- [3] SCHARBER M. C., SARICIFTCI N.S., *Efficient of bulk-heterojunction organic solar cells*, Progress in Polymer Science, 2013, 38, 1929–1940.

- [4] <http://www.heliatek.com/en/press/press-releases/details/heliatek-sets-new-organic-photovoltaic-world-record-efficiency-of-13-2>
- [5] FIEDUCIK J., GODLEWSKI J., *Ekonomiczne i środowiskowe aspekty skoncentrowanej fotowoltaiki*, Przegląd fotowoltaiczny, 2015, 9, 24–26.
- [6] KUKLO K., *Światowy rekord sprawności organicznych ogniw PV*, Magazyn fotowoltaika, 2016, 1, 14–15.
- [7] CLEMENT RAJ C., PRASANTH R., *A critical review of recent developments in nanomaterials for photoelectrodes in dye sensitized solar cells*, Journal of Power Sources, 2016, 317, 120–132.
- [8] BENEDETTI J.E., CORRÊA A.A., CARMELLO M., ALMEIDA L.C.P., GONCALVES A.S., NOGUEIRA A.F., *Cross-linked gel polymer electrolyte containing multi-wall carbon nanotubes for application in dye-sensitized solar cells*, Journal of Power Sources, 2012, 208, 263–270.
- [9] JUNG M.-H., *Polypyrrole/poly(vinyl alcohol-co-ethylene) quasi-solid gel electrolyte for iodine-free dye-sensitized solar cells*, Journal of Power Sources, 2014, 268, 557–564.
- [10] ZHANG S., DONG G.-Y., LIN B., QU J., YUAN N.-Y., DING J.-N., *A polymer gel electrolyte with an inverse opal structure and its effects on the performance of quasi-solid-state dye-sensitized solar cells*, Journal of Power Sources, 2015, 277, 52–58.
- [11] KONTOS A.G., STERGIOPOULOS T., LIKODIMOS V., MILLIKEN D., DESILVESTO H., TULLOCH G., FALARAS P., *Long-Term Thermal Stability of Liquid Dye Solar Cells*, Journal of Physical Chemistry Part C, 2013, 117, 8636–8646.
- [12] LIU M., JOHNSTON M.B., SNAITH H.J., *Efficient planar heterojunction perovskite solar cells by vapour deposition*, Nature, 2013, 501, 395–398.
- [13] GIUSTINO F., SNAITH H., *Towards Lead-free Perovskite Solar Cells*, ACS Energy Letters. DOI: 10.1021/acsenerylett.6b00499.2016.
- [14] SEO J., NOH JUN H., IL SEOK S., *Rational Strategies for Efficient Perovskite Solar Cells*, Accounts of Chemical Research, 2016, 49, 562–572.
- [15] HSU W.-C., REPINS I., BEALL C., DE HART C., TEETER G., TO B., YANG Y., NOUFI R., *The effect of Zn excess on kesterite solar cells*, Solar Energy Materials & Solar Cells, 2013, 113, 160–164.
- [16] LIU X., FENG Y., CUI H., LIU F., HAO X., CONIBEEER G., MITZI D.B., GREEN M., *The current status and future prospects of kesterite solar cells: a brief review*, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2016, 24, 879–898.
- [17] KLUGMANN-RADZIEMSKA E., OSTROWSKI P., LEWANDOWSKI W.M., RYMS M., *Aspekty ekologiczne i ekonomiczne recyklingu krzemowych ogniw i modułów fotowoltaicznych*, Nafta–Gaz, 2010, 6, 481–485.
- [18] PALEWICZ M., IWAN A., *Polimerowe ogniwa słoneczne*, Polimery, 2011, 56, 99–107.
- [19] BUNDGAARD E., KREBS F.C., *Low band gap polymers for organic photovoltaics*, Solar Energy Materials & Solar Cells, 2007, 91, 954–985.
- [20] ZHAN X., ZHU D., *Conjugated polymers for high-efficiency organic photovoltaics*, Polymer Chemistry, 2010, 1, 409–419.
- [21] PALEWICZ M., IWAN A., *Photovoltaic phenomenon in polymeric thin layer solar cells*, Current Physical Chemistry, 2011, 1, 27–54.
- [22] LI Y., *Molecular design of photovoltaic materials for polymer solar cells: Towards suitable electronic energy levels and broad absorption*, Accounts of Chemical Research, 2012, 45, 723–733.
- [23] KESTERS J., KUDRET S., BERTHO S., VAN DEN BRANDE N., DEFOUR M., VAN MELE B., PENXTEN H., LUTSEN L., MANCA J., VANDERZANDE D., MAES W., *Enhanced intrinsic stability of the bulk heterojunction active layer blend of polymer solar cells by varying the polymer side chain pattern*, Organic Electronics, 2014, 15, 549–562.
- [24] CHEN J.T., HSU C.S., *Conjugated polymer nanostructures for organic solar cell applications*, Polymer Chemistry, 2011, 2, 2707–2722.

- [25] SAUVE G., FERNANDO R., *Beyond Fullerenes: Designing Alternative Molecular Electron Acceptors for Solution-Processable Bulk Heterojunction Organic Photovoltaics*, Journal of Physical Chemistry Letters, 2015, 6, 3770–3780.
- [26] LAI Y.-Y., CHENG Y.-J., HSU C.-S., *Applications of functional fullerene materials in polymer solar cells*, Energy & Environmental Science, 2014, 7, 1866–1883.
- [27] GHENO A., VEDRAINE S., RATIER B., BOUCLÉ J., *π -Conjugated Materials as the Hole-Transporting Layer in Perovskite Solar Cells*, Metals, 2016, 6, 21.
- [28] SIN D.H., KO H., JO S.B., KIM M., BAE G.Y., CHO K., *Decoupling Charge Transfer and Transport at Polymeric Hole Transport Layer in Perovskite Solar Cells*, ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8, 6546–6553.
- [29] PETRUS M.L., BEIN T., DINGEMAN T.J., DOCAMPO P., *A low cost azomethine-based hole transporting material for perovskite photovoltaics*, Journal of Materials Chemistry A, 2015, 3, 12159–12162.
- [30] LIN Q., HUANG H., JING Y., FU H., CHANG P., LI D., YAO Y., FAN Z., *Flexible photovoltaic technologies*, Journal of Materials Chemistry C, 2014, 2, 1233–1247.
- [31] AMERI T., KHORAM P., MIN J., BRABEC C.J., *Organic Ternary Solar Cells: A Review*, Advanced Materials, 2013, 25, 4245–4266.
- [32] HADIPOUR A., DE BOER B., BLOM P.W.M., *Organic tandem and multi-junction solar cells*, Advanced Functional Materials, 2006, 18, 169–181.
- [33] YOU J., DOU L., HONG Z., LI G., YANG Y., *Recent trends in polymer tandem solar cells research*, Progress in Polymer Science, 2013, 38 1909–1928.
- [34] LIU F., NUNZI J. M., *Air stable hybrid inverted tandem solar cell design*, Applied Physics Letters, 2011, 99, 063301/1-3.
- [35] IWAN A., CHUCHMAŁA A., *Perspectives of Applied Graphene: Polymer Solar Cells*, Progress in Polymer Science, 2012, 37, 1805–1828.
- [36] PARK H., CHANG S., JEAN J., CHENG J.J., ARAUJO P.T., WANG M., BAWENDI M.G., DRESSELHAUS M.S., BULOVIĆ V., KONG J., GRADECAK S., *Graphene cathode-based ZnO nanowire hybrid solar cells*, Nano Letters, 2013, 13, 233–239.
- [37] JUNG J.W., LEE J.U., JO W.H., *High-Efficiency Polymer Solar Cells with Water-Soluble and Self-Doped Conducting Polyaniline Graft Copolymer as Hole Transport Layer*, Journal of Physical Chemistry Part C, 2010, 114, 633–637.
- [38] SUN J., ZHU Y., XU X., LAN L., ZHANG L., CAI P., CHEN J., PENG J., CAO Y., *High Efficiency and High V_{oc} Inverted Polymer Solar Cells Based on a Low-Lying HOMO Polycarbazole Donor and a Hydrophilic Polycarbazole Interlayer on ITO Cathode*, Journal of Physical Chemistry Part C, 2012, 116, 14188–14198.
- [39] SUN Q., PARK K., DAI L., *Liquid Crystalline Polymers for Efficient Bilayer-Bulk-Heterojunction Solar Cells*, Journal of Physical Chemistry Part C, 2009, 113, 7892–7897.
- [40] ZHENG Q., FANG G., BAI W., SUN N., QIN P., FAN X., CHENG F., YUAN L., ZHAO X., *Efficiency improvement in organic solar cells by inserting a discotic liquid crystal*, Solar Energy Materials & Solar Cells, 2011, 95, 2200–2205.
- [41] RYU M.S., CHA H.J., JANG J., *Improvement of operation lifetime for conjugated polymer:fullerene organic solar cells by introducing a UV absorbing film*, Solar Energy Materials & Solar Cells, 2010, 94, 152–156.
- [42] REESE M.O., GEVORGYAN S.A., JØRGENSEN M., BUNDGAARD E., KURTZ S. R., GINLEY D. S., OLSON D.C., LLOYD M.T., MORVILLO P., KATZ E.A., ELSCHNER A., HAILLANT O., CARRIER T.R., SHROTRIYA V., HERMENAU M., RIEDE M., KIROV K.R., TRIMMEL G., RATH T., INGANAS O., ZHANG F., ANDERSSON M., TVINGSTEDT K., LIRA-CANTU M., LAIRD D., MCGUINNESS C., GOWRISANKER S.(J.), PANNONE M., XIAO M., HAUCH J.,

- STEIM R., DE LONGCHAMP D.M., ROSCH R., HOPPE H., ESPINOSA N., URBINA A., YAMAN-UZUNOGLU G'ULSAH, BONEKAMP J.-B., VAN BREEMEN A.J.J.M., GIROTTO C., VOROSHAZI E., KREBS F.C., *Consensus stability testing protocols for organic photovoltaic materials and devices*, Solar Energy Materials & Solar Cells, 2011, 95, 1253–1267.
- [43] GARCIA-BELMONTE G., MUNAR A., BAREA E.M., BISQUERT J., UGARTE I., PACIOS R., *Charge carrier mobility and lifetime of organic bulk heterojunctions analyzed by impedance spectroscopy*, Organic Electronics, 2008, 9, 847–851.
- [44] LEEVER B.J., BAILEY C.A., MARKS T.J., HERSAM M.C., DURSTOCK M.F., *In Situ Characterization of Lifetime and Morphology in Operating Bulk Heterojunction Organic Photovoltaic Devices by Impedance Spectroscopy*, Advanced Energy Materials, 2012, 2, 120–128.
- [45] IWAN A., PALEWICZ M., CHUCHMAŁA A., GORECKI L., SIKORA A., MAZUREK B., PASCIAK G., *Opto(electrical) properties of new aromatic polyazomethines with fluorene moieties in the main chain for polymeric photovoltaic devices*, Synthetic Metals, 2012, 162, 143–153.
- [46] GRANKOWSKA CIECHANOWICZ S., KORONA K.P., WOŁOS A., DRABINSKA A., IWAN A., TAZBIR I., WOJTKIEWICZ J., KAMINSKA M., *Towards Better Efficiency of Air-Stable Polyazomethine-Based Organic Solar Cells Using Time-Resolved Photoluminescence and Light-Induced Electron Spin Resonance as Verification Methods*, Journal of Physical Chemistry Part C, 2016, 120, 11415–11425.
- [47] IWAN A., PALEWICZ M., TAZBIR I., BOHAREWICZ B., PIETRUSZKA R., FILAPEK M., WOJTKIEWICZ J., WITKOWSKI B.S., GRANIEK F., GODLEWSKI M., *Influence of ZnO:Al, MoO₃ and PEDOT:PSS on efficiency in standard and inverted polymer solar cells based on polyazomethine and poly(3-hexylthiophene)*, Electrochimica Acta, 2016, 191, 784–794.
- [48] IWAN A., BOHAREWICZ B., TAZBIR I., FILAPEK M., KORONA K.P., WRÓBEL P., STEFANIUK T., CIESIELSKI A., WOJTKIEWICZ J., WRONKOWSKA A.A., WRONKOWSKI A., ZBOROMIRSKA-WNUKIEWICZ B., GRANKOWSKA-CIECHANOWICZ S., KAMINSKA M., SZOPLIK T., *How do 10-camphorsulfonic acid, silver or aluminum nanoparticles influence optical, electrochemical, electrochromic and photovoltaic properties of air and thermally stable triphenylamine-based polyazomethine with carbazole moieties?* Electrochimica Acta, 2015, 185, 198–210, 2015.
- [49] JUNG J., *Fotogeneracja nośników ładunków w wielkocząsteczkowych kompleksach donorowo-akceptorowych*, Praca doktorska, Politechnika Łódzka, 2001.
- [50] SCHMIDT D., HAGER M.D., SCHUBERT U.S., *Photo-rechargeable electric energy storage systems*, Advanced Energy Materials, 2016, 6, 1500369.
- [51] POPE M., SWENBERG C.E., *Excitonic Processes in Organic Crystals*, Oxford: Charendon Press 1982.
- [52] GODLEWSKI J., *Wstęp do elektroniki molekularnej*, Politechnika Gdańska, 2007.
- [53] STAPIŃSKI T., MARSZAŁEK K., JAGLARZ J., *Właściwości optyczne pokryć antyrefleksyjnych dla zastosowań fotowoltaicznych*, Przegląd Elektrotechniczny, 2014, R. 90, nr 9, 91–93.
- [54] WACZYŃSKI K., FILIPOWSKI W., DRABCZYK K., *Badanie właściwości cienkich warstw antyrefleksyjnych z dwutlenku tytanu w strukturze ogniwa fotowoltaicznego*, Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania, 2011, 4, 77–79.
- [55] GONG X., TONG M., BRUNETTI F.G., SEO J., SUN Y., MOSES D., WUDL F., HEEGER A.J., *Bulk Heterojunction Solar Cells with Large Open-Circuit Voltage: Electron Transfer with Small Donor-Acceptor Energy Offset*, Advanced Materials, 2011, 23, 2272–2277.
- [56] ZHOU H., YANG L., YOU W., *Rational design of high performance conjugated polymers for organic solar cells*, Macromolecules, 2012, 45, 607–632.
- [57] ZHANG S., YE L., HOU J., *Breaking the 10% Efficiency Barrier in Organic Photovoltaics: Morphology and Device Optimization of Well-Known PBDTTT Polymers*, Advanced Energy Materials, 2016, 6, 1502529.

- [58] ZHENG Z., ZHANG S., ZHANG M., ZHAO K., YE L., CHEN Y., YANG B., HOU J., *Highly efficient tandem polymer solar cells with a photovoltaic response in the visible light range*, *Advanced Materials*, 2015, 27, 1189–1194.
- [59] ZUO L.J., CHANG C.Y., CHUEH C.C., ZHANG S.H., LI H.Y., JEN A.K.Y., CHEN H.Z., *Design of a versatile interconnecting layer for highly efficient series-connected polymer tandem solar cells*, *Energy & Environmental Science*, 2015, 8, 1712–1718.
- [60] OUYANG X., PENG R., AI L., ZHANG X., GE Z., *Efficient polymer solar cells employing a non-conjugated small-molecule electrolyte*, *Nature Photonics*, 2015, 9, 520–524.
- [61] CAI W., GONG X., CAO Y., *Polymer solar cells: Recent development and possible routes for improvement in the performance*, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2010, 94, 114–127.
- [62] IWAN A., BOHAREWICZ B., TAZBIR I., MALINOWSKI M., FILAPEK M., KŁĄB T., LUSZCZYŃSKA B., GŁOWACKI I., KORONA K.P., KAMINSKA M., WOJTKIEWICZ J., LEWANDOWSKA M., HRENIAK A., *New environmentally friendly polyazomethines with thiophene rings for polymer solar cells*, *Solar Energy*, 2015, 117, 246–259.
- [63] IWAN A., BOHAREWICZ B., TAZBIR I., FILAPEK M., *Enhanced power conversion efficiency in bulk heterojunction solar cell based on new polyazomethine with vinylene moieties and [6,6]-phenyl C₆₁ butyric acid methyl ester by adding 10-camphorsulfonic acid*, *Electrochimica Acta*, 2015, 159, 81–92.
- [64] BUBNOV A., IWAN A., CIGL M., BOHAREWICZ B., TAZBIR I., WÓJCIK K., SIKORA A., HAMPLOVÁ V., *Photosensitive self-assembling materials as functional dopants for organic photovoltaic cells*, *RSC Advances*, 2016, 6, 11577–11590.
- [65] IWAN A., BOHAREWICZ B., TAZBIR I., HAMPLOVÁ V., BUBNOV A., *Effect of chiral photosensitive liquid crystalline dopants on the performance of organic solar cells*, *Solid State Electronics*, 2015, 104, 53–60.
- [66] BIELECKA U., *Wykorzystanie efektu polowego w badaniach właściwości elektrycznych poli(3-heksylotiofenu)*, Praca doktorska, Politechnika Wrocławska, 2015.
- [67] CHANG Y.-H., TSENG S.-R., CHEN C.-Y., MENG H.-F., CHEN E.-C., HORNG S.-F., HSU C.-S., *Polymer solar cell by blade coating*, *Organic Electronics*, 2009, 10, 741–746.
- [68] BYUN W.-B., LEE S.K., LEE J.-C., MOON S.-J., SHIN W.S., *Bladed organic photovoltaic cells*, *Current Applied Physics*, 2011, 11, S179–S184.
- [69] GŁOWACKI I., *Organiczne element i urządzenia elektroniczne: techniki wytwarzania i właściwości*, Przegląd Elektrotechniczny, 2013, R. 89, nr 10, 61–64.
- [70] WONG W.-Y., HO C.-L., *Organometallic Photovoltaics: A New and Versatile Approach for Harvesting Solar Energy Using Conjugated Polymetallaynes*, *Accounts of Chemical Research*, 2010, 43, 1246–1256.
- [71] YU J.C., JANG J.I., LEE B.R., LEE G.-WO., HAN J.T., SONG M.H., *Highly efficient polymer-based optoelectronic devices using PEDOT:PSS and a GO composite layer as a hole transport layer*, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2014, 6, 2067–2073.
- [72] PO R., CARBONERA C., BERNARDI A., TINTI F., CAMAIONI N., *Polymer- and carbon-based electrodes for polymer solar cells: Toward low-cost, continuous fabrication over large area*, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2012, 100, 97–114.
- [73] KYMAKIS E., STYLIANAKIS M.M., SPYROPOULOS G.D., STRATAKIS E., KOUDOUMAS E., FOTAKIS C., *Spin coated carbon nanotubes as the hole transport layer in organic photovoltaics*, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2012, 96, 298–301.
- [74] LU L., LUO Z., XU T., YU L., *Cooperative Plasmonic Effect of Ag and Au Nanoparticles on Enhancing Performance of Polymer Solar Cells*, *Nano Letters*, 2013, 13, 59–64.
- [75] BAEK S.-W., PARK G., NOH J., CHO C., LEE C.-H., SEO M.-K., SONG H., LEE J.-Y., *Au@Ag Core-Shell Nanocubes for Efficient Plasmonic Light Scattering Effect in Low Bandgap Organic Solar Cells*, *ACS Nano*, 2014, 8, 3302–3312.

- [76] CHEN F.C., CHIEN S.C., *Nanoscale functional interlayers formed through spontaneous vertical phase separation in polymer photovoltaic devices*, Journal of Materials Chemistry, 2009, 19, 6865–6869.
- [77] KREBS F.C., BIANCARDO M., WINTHER-JENSEN B., SPANGGARD H., ALSTRUP J., *Strategies for incorporation of polymer photovoltaics into garments and textiles*, Solar Energy Materials & Solar Cells, 2006, 90, 1058–1067.
- [78] YIN Z., SUN S., SALIM T., WU S., HUANG X., HE Q., LAM Y.M., ZHANG H., *Organic photovoltaic devices using highly flexible reduced graphene oxide films as transparent electrodes*, ACS Nano, 2010, 4, 5263–5268.
- [79] LEE S., YEO J.-S., JI Y., CHO C., KIM D.-Y., NA S.-I., LEE B.H., LEE T., *Flexible organic solar cells composed of P3HT:PCBM using chemically doped graphene electrodes*, Nanotechnology, 2012, 23, 344013.
- [80] BEDELOGLU A., DEMIR A., BOZKURT Y., SERDAR SARICIFTCI N., *A flexible textile structure based on polymeric photovoltaics using transparent cathode*, Synthetic Metals, 2009, 159, 2043–2048.
- [81] MERSHIN A., MATSUMOTO K., KAISER L., YU D., VAUGHN M., NAZEERUDDIN MD.K., BRUCE B.D., GRAETZEL M., ZHANG S., *Self-assembled photosystem-I biophotovoltaics on nanostructured TiO₂ and ZnO*, Scientific Reports, 2012, 2, 234.
- [82] DANG X., YI H., HAM M.-H., QI J., YUN D.S., LADEWSKI R., STRANO M.S., HAMMOND P.T., BELCHER A.M., *Virus-templated self-assembled single-walled carbon nanotubes for highly efficient electron collection in photovoltaic devices*, Nature Nanotechnology, 2011, 6, 377–384.
- [83] JEFFRYES C., GUTU T., JIAO J., RORRER G.L., *Metabolic Insertion of Nanostructured TiO₂ into the Patterned Biosilica of the Diatom Pinnularia sp. by a Two-Stage Bioreactor Cultivation Process*, ACS Nano, 2008, 2, 2103–2111.
- [84] ZHOU Y., FUENTES-HERNANDEZ C., KHAN T.M., LIU J.-C., HSU J., SHIM J.W., DINDAR A., YOUNGBLOOD J.P., MOON R.J., KIPPELEN B., *Recyclable organic solar cells on cellulose nanocrystal substrates*, Scientific Reports, 2013, 3, 1536.
- [85] GIBSON T.L., KELLY N.A., *Solar photovoltaic charging of lithium-ion batteries*, Journal of Power Sources, 2010, 195, 3928–3932.
- [86] BEAUJUGE P.M., FRÉCHET J.M.J., *Molecular Design and Ordering Effects in π -Functional Materials for Transistor and Solar Cell Applications*, Journal of American Chemical Society, 2011, 133, 20009–20029.
- [87] DENNLER G., BEREZNEV S., FICHOU D., HOLL K., ILIC D., KOEPPE R., KREBS M., LABOURET A., LUNGENSCHMIED C., MARCHENKO A., MEISSNER D., MELLIKOV E., MÉOT J., MEYER A., MEYER T., NEUGEBAUER H., ÖPIK A., SARICIFTCI N., TAILLEMITE S., WÖHRLE T., *A self-rechargeable and flexible polymer solar battery*, Solar Energy, 2007, 81, 947–957.
- [88] PANDEY A.K., DEAKIN P.C., JANSEN-VAN VUUREN R.D., BURN P.L., SAMUEL I.D.W., *Photo-Rechargeable Battery Effect in First Generation Cationic-Cyanine Dendrimers*, Advanced Materials, 2010, 22, 3954–3958.
- [89] LEE Y.-H., KIM J.-S., NOH J., LEE I., KIM H.J., CHOI S., SEO J., JEON S., KIM T.-S., LEE J.-Y., CHOI J.W., *Wearable Textile Battery Rechargeable by Solar Energy*, Nano Letters, 2013, 13, 5753–5761.
- [90] XU J., CHEN Y., DAI L., *Efficiently photo-charging lithium-ion battery by perovskite solar cell*, Nature Communications, 2015, 6, 8103.
- [91] KANG H., KIM G., HWANG I.-W., KIM Y., LEE K.C., PARK S.H., LEE K., *High-performance polymer tandem devices combining solar cell and light-emitting diode*, Solar Energy Materials & Solar Cells, 2012, 107, 148–153.
- [92] DRABCZYK K., MALECZEK S., STOGA D., *Koncepcja quasi-elastycznych mozaikowych baterii słonecznych*, Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania, 2013, 54, 24–25.
- [93] DRABCZYK K., MALECZEK S., STOGA D., *Koncepcja pozyskiwania i magazynowania energii na powierzchni z wykorzystaniem quasi-elastycznych mozaikowych baterii słonecznych*, Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania, 2015, 8.

- [94] MALECZEK S., MALICKI W., DRABCZYK K., CEBRAT A., *Badanie elastycznych paneli fotowoltaicznych w aspekcie zastosowań militarnych*, Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania, 2014, 55, 55–58.
- [95] DRABCZYK K., MALECZEK S., *Badanie układów warstw zabezpieczających i kontaktów elektrycznych do zastosowań w quasi elastycznych taśmach fotowoltaicznych*, Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania, 2015, 56, 13–14.
- [96] DRABCZYK K., MALECZEK S., PANEK P., *Quasi-elastyczne mozaikowe taśmy fotowoltaiczne*, Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania, 2014, 55, 62–63.
- [97] LIPIŃSKI M., KULESZA G., STAROWICZ Z., *Obrazowanie luminescencyjne do charakteryzacji ogniw i modułów fotowoltaicznych*, Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania, 2014, 55, 52–54.
- [98] Sprawozdanie z realizacji pracy pt. Specjalne systemy fotowoltaiczne do zastosowania w siłach zbrojnych RP, WITI, Wrocław, 2011.
- [99] Sprawozdanie z realizacji pracy pt. Filtr uzdatniania wody klasy K1-K2 zasilany baterią fotowoltaiczną, WITI, Wrocław, 2012.
- [100] Wzór użytkowy pt. Filtr do oczyszczania wody. W. Maliszewski, R. Mazurczuk, K. Szyszka, A. Kwak, S. Maleczek, Z. Tarnowski, R. Zatoński, T. Pawłowski, 2014.

ORGANIC AND FLEXIBLE SOLAR CELLS – ACTUALITY AND OPPORTUNITIES

Based on the review of literature and own research on the third and fourth generation of the solar cells the analysis of the possibility of practical use of organic photovoltaic cells is presented. The types of solar cells, including their advantages and disadvantages are described. The methods used for study and characterization of the cells and individual layers of the organic solar cell are presented. Selected technical parameters of various types of photovoltaic cells were analyzed with particular emphasis on the efficiency of the cell in the commercial and laboratory conditions. The paper presents general principles and progress of the project entitled “The innovative flexible photovoltaic cover” carry out at the GECKO program – Generator Concept of Ecological National Centre for Research and Development and the National Fund for Environmental Protection and Water Management. The work is completed by the presentation of finished products based on solar cells manufactured at the Military Institute of Technical Engineering in Wrocław (WITI) for military applications.

Dariusz SAWICKI*, Agnieszka WOLSKA**

WYBRANE PROBLEMY OCENY OŚLNIENIA

Oślnienie jest zjawiskiem towarzyszącym procesowi widzenia, które może powodować odczucie niewygodny lub zmniejszenie zdolności percepcyjnych człowieka. Dotychczas ocena oślnienia sprowadzała się tylko do etapu projektowego (obliczenia symulacyjne) lub subiektywnej oceny oślnienia, gdyż nie było odpowiednich metod do wyznaczania pomiarowego wskaźników oślnienia, dla których wymagania określają normy. Ocena oślnienia jest problemem złożonym zarówno w aspekcie oceny subiektywnej, jak i obiektywnej. W rozdziale przedstawiono charakterystykę zjawiska oślnienia w odniesieniu do historii badań naukowych oraz ewolucji metod służących do jego oceny. Na tym tle przedstawiono Autorskie metody oceny oślnienia, w tym: metodę szacunkowej oceny rodzaju oślnienia, a także subiektywnej oceny oślnienia na zewnętrznych stanowiskach pracy. Przedstawiono wybrane problemy metrologiczne związane z oceną oślnienia oraz metodę wyznaczania pomiarowego dwóch wskaźników oślnienia *UGR* i *GR*. Przedstawiono analizę błędów pomiarowych podczas wyznaczania tych wskaźników oraz zaproponowano nową ujednoczoną skalę semantyczną oceny oślnienia dla tych wskaźników, obejmującą zakres oślnienia rozpatrywany doświadczalnie i pomiarowo.

1. WSTĘP

Światło odgrywa kluczową rolę w życiu człowieka. Oprócz stymulowania systemu wzrokowego reguluje system okołodobowy człowieka, wpływając na pracę praktycznie wszystkich tkanek w organizmie. Przez zmysł wzroku, światło ma znaczny wpływ na świadomość otaczającego nas świata. Zapewnia postrzeganie jasności, barwy, kształtu, ruchu oraz obrazu.

Światło naturalne zapewnia człowiekowi oświetlenie, które umożliwia człowiekowi widzenie barwne otaczającego świata oraz wykonywanie wszelkich czynności niezbędnych do życia. Człowiek nauczył się szukać cienia, jeśli jest zbyt jasno i ustawić

* Wydział Elektryczny, Politechnika Warszawska, pl. Politechniki 1, Warszawa.

** Zakład Techniki Bezpieczeństwa, Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Czerniakowska 16, 01-149 Warszawa.

tak w kierunku słońca, aby nie widzieć jego nadmiernie jaskrawej powierzchni – nie doznawać olśnienia. Jednak długość pory dziennej zmienia się w zależności od pory roku i w okresie zimowym jest ona najkrótsza, a co się z tym wiąże funkcjonowanie człowieka przy świetle dziennym ograniczone. Wraz z rozwojem technologicznym i wprowadzeniem sztucznych źródeł światła czas czuwania i pracy człowieka znacznie się wydłużył. Okazało się, że wprowadzenie sztucznych źródeł światła nie może być przypadkowe, tylko musi spełniać pewne zasady, tak aby z jednej strony zapewnić bezpieczeństwo, a z drugiej wygodę widzenia podczas wykonywania czynności wzrokowych. Nauką zajmującą się zastosowaniem światła do oświetlenia użytecznego dla człowieka jest technika świetlna. Obejmuje wiele działań związanych z przeniesieniem nauki i technologii do praktyki. Na podstawie wielu badań z udziałem człowieka określono kilka parametrów oświetlenia, które charakteryzują otoczenie świetlne danej przestrzeni. Opracowano również wymagania oświetleniowe dla różnych wnętrz, miejsc i czynności pracy, w zależności od trudności pracy wzrokowej. Wymagania te odnoszą się do wartości liczbowych poszczególnych parametrów oświetlenia, do których zalicza się przede wszystkim: natężenie oświetlenia i jego równomierność, rozkład luminancji, olśnienia, barwę światła i oddawanie barw. Parametry te powinny spełniać wymagania stawiane przez normy oświetleniowe. Dotyczy to w szczególności miejsc pracy, gdzie obowiązkiem pracodawcy jest zapewnienie oświetlenia o parametrach zgodnych z polskimi normami (art. 26 ust. 2 rozporządzenia MPiPS z dnia 26 września 1997 r. w sprawie ogólnych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy. Dz.U. 1997, nr 129, poz. 844). Istotne jest zatem zweryfikowanie w miejscu pracy czy istniejące parametry oświetleniowe spełniają wymagania normy. W praktyce sprawdzane są najczęściej tylko dwa parametry: natężenie oświetlenia i jego równomierność, które odnoszą się jedynie do cech ilościowych oświetlenia. W celu zapewnienia wygody widzenia znacznie bardziej istotne są cechy jakościowe oświetlenia, które dotyczą barwy światła i oddawania barw, a przede wszystkim właściwego ograniczenia olśnienia. O ile barwę światła i wskaźnik oddawania barw można odczytać z kodu źródła lub z katalogu, to w przypadku oceny olśnienia nie jest to możliwe. Olśnienie jest zjawiskiem towarzyszącym procesowi widzenia, które może powodować odczucie niewygody i (lub) zmniejszenie zdolności percepcyjnych człowieka. Dotychczas ocena olśnienia sprowadzała się tylko do etapu projektowego (obliczenia symulacyjne), gdyż nie było odpowiednich metod do wyznaczania pomiarowego wskaźników olśnienia, dla których wymagania określają normy. Olśnienie jest zjawiskiem bardzo trudnym do oceny. Zapoznanie się ze zjawiskiem olśnienia i jego oddziaływania na psychofizjologię człowieka w powiązaniu z detekcją wzrokową narządu wzroku jest punktem wyjścia do zrozumienia różnych rodzajów olśnienia oraz związanych z nimi metod oceny. Bez tego nie byłoby możliwe opracowanie wskaźników liczbowych do oceny olśnienia, a co zatem idzie opracowanie metod jego oceny, w tym na podstawie pomiarów. Aby ułatwić realizację procesu oceny i pomiaru właściwości tego zjawiska zaproponowano pewną miarę, która odzwierciedla najważniejsze właściwości olśnie-

nia. Miarę tę nazwano wskaźnikiem olśnienia. Niestety złożoność zjawiska i trudności w jego opisie nie uwzględniły wszystkich właściwości w różnych warunkach oświetleniowych, w których mamy do czynienia z olśnieniem. Powstało wiele różnych wskaźników przypisanych do określonych warunków: inne dla oświetlenia wewnątrz światłem sztucznym, inne dla oświetlenia na zewnątrz, inne dla oświetlenia drogowego i jeszcze inne dla oświetlenia wewnątrz światłem dziennym.

Jednak ocena olśnienia, a w szczególności pomiar wskaźników olśnienia nie jest sprawą prostą, stąd tak wiele badań od lat dwudziestych XX wieku do dnia dzisiejszego było i jest nadal prowadzonych. Nadal nie do końca są poznane mechanizmy powstawania olśnienia przykrego, a opracowane wskaźniki olśnienia przykrego są modyfikowane lub rozważa się wprowadzenia nowych.

Przedmiotem rozważań w tym rozdziale jest przedstawienie wielu aspektów związanych z oceną oświetlenia ze szczególnym uwzględnieniem oceny olśnienia. Przedstawione zostały podstawowe informacje dotyczące światła jako wielkości fizycznej oraz jako bodźca wzrokowego inicjującego detekcję wzrokową. Następnie analizowano podstawowe parametry oświetlenia, które powinny być wyznaczane na stanowiskach pracy oraz określono problemy z pomiarem niektórych z nich. Scharakteryzowano zjawisko olśnienia, a także problem oceny olśnienia wraz z genezą prac naukowych poświęconych temu zjawisku oraz metodom oceny olśnienia. Biorąc pod uwagę praktyczne zastosowanie wskaźników olśnienia i potrzebę wykonywania ich pomiarów Autorzy niniejszego opracowania skupili się przede wszystkim na wskaźnikach *UGR* i *GR*. Przedstawiono wybrane problemy metrologiczne związane z oceną olśnienia oraz metodę wyznaczania pomiarowego tych dwóch wskaźników olśnienia. Wykazano analizę błędów pomiarowych podczas wyznaczania tych wskaźników oraz zaproponowano nową ujednoczoną skalę semantyczną oceny olśnienia dla tych wskaźników, obejmującą zakres olśnienia rozpatrywany doświadczalnie i praktycznie pomiarowo.

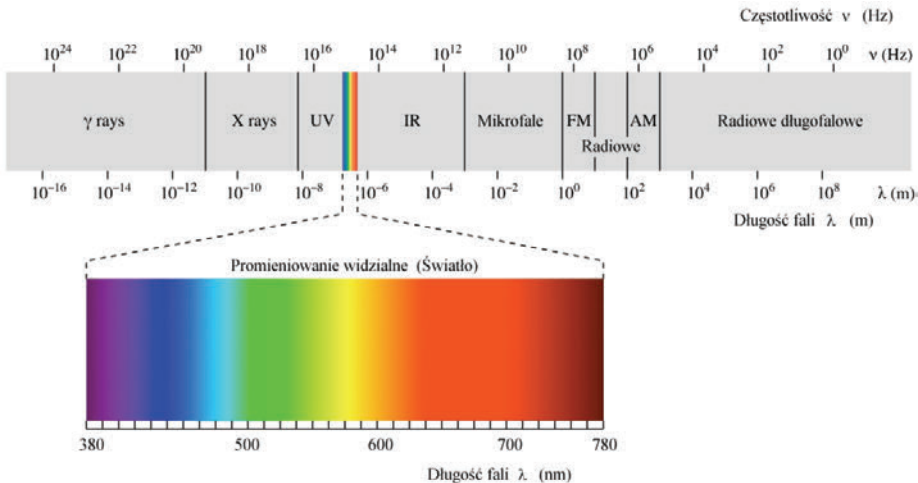
Przedstawione w tym rozdziale informacje stanowią kompendium aktualnej wiedzy na temat zjawiska olśnienia, metod jego oceny oraz wybranych problemów związanych z pomiarem wskaźników olśnienia.

2. ŚWIATŁO

2.1. ŚWIATŁO JAKO WIELKOŚĆ FIZYCZNA

W najprostszym ujęciu światło jest to widziana przez narząd wzroku człowieka część promieniowania elektromagnetycznego. Stąd ten zakres promieniowania elektromagnetycznego nazywany jest również promieniowaniem widzialnym. Ze względu na różnice międzyosobnicze postrzeganych granic tego promieniowania (wzrok każdego człowieka ma nieco inną wrażliwość na światło) nie ma jednoznacznego okre-

ślenia zakresu promieniowania widzialnego. W literaturze można spotkać różne wartości graniczne tego zakresu, gdzie wartość minimalna przyjmowana może być od 380 do 400 nm, a wartość maksymalna od 700 do 800 nm. Jednak w technice świetlnej oraz przy ocenie zagrożeń powodowanych przez promieniowanie widzialne przyjmuje się zakres 380–780 nm. Poszczególnym długościom fali odpowiada określona barwa światła, począwszy od fioletu, a skończywszy na czerwieni (rys. 1).



Rys. 1. Widmo promieniowania elektromagnetycznego z wydzielonym widmem promieniowania widzialnego (światła), na podstawie: [48] i [166]

Fig. 1. Spectrum of electromagnetic radiation with extracted visual radiation (light)

Zgodnie z dualizmem korpuskularno-falowym, światło jest jednocześnie falą elektromagnetyczną oraz strumieniem cząstek nazywanych fotonami. Dualizm korpuskularno-falowy polega na wykazywaniu właściwości falowych (np. dyfrakcja światła) lub korpuskularnych światła (np. pęd).

Energia niesiona przez światło jest kwantowana, tzn. przesyłana jest w pewnych porcjach zwanych fotonami. Energia pojedynczego fotonu jest wprost proporcjonalna do częstotliwości światła i wyraża się wzorem (1):

$$E_f = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad (1)$$

gdzie: $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ J·s – stała Plancka, f – częstotliwość światła monochromatycznego w Hz, $c = 300\,000$ km/s – prędkość światła, λ – długość fali, $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ J.

W zakresie promieniowania widzialnego największa energia fotonu występuje dla długości fali 380 nm i wynosi ok. 3,26 eV, a najmniejsza dla długości fali 780 nm i wynosi 1,56 eV. Im większa długość fali, tym mniejsza jest energia fotonu niesiona przez tę falę.

Światło, padając na siatkówkę oka, dostarcza do pięciu rodzajów fotoreceptorów określoną energię fotonów, która poprzez czopki (czerwony, zielony, niebieski) i pręciki umożliwia człowiekowi widzenie, natomiast poprzez światłoczułe komórki zwojowe ipRGCs (ang. *intrinsically photosensitive Retinal Ganglion Cells*) [114] zawiaduje zwężaniem źrenicy oraz cyklem okołodobowym snu i czuwania. Liczba i energia fotonów światła padającego na siatkówkę decyduje o jasności i barwie obserwowanego obiektu, zawiaduje zwężaniem źrenicy, a jednocześnie hamuje w mniejszym lub większym stopniu wydzielanie melatoniny w organizmie, a także przy wystarczająco dużej liczbie fotonów o określonej energii może powodować fotochemiczne uszkodzenia siatkówki oka.

2.2. DETEKcja WZROKOWA

– WZROKOWE ODDZIAŁYWANIE ŚWIATŁA NA SIATKÓWKĘ

Światło docierające do wnętrza oka przez źrenicę podlega najpierw prawom optyki geometrycznej w rogówce i soczewce, a następnie dociera do siatkówki oka, na której formowany jest pozorny, odwrócony i zmniejszony obraz obserwowanego obiektu [158]. Padające na siatkówkę fotony światła wywołują reakcje fotochemiczne w fotoreceptorach, powodując depolaryzację błony i przepływ impulsu neuronami nerwu wzrokowego. Fotoreceptory zatem zamieniają kwanty światła w potencjał elektryczny za pomocą serii przemian chemicznych. Na siatkówce oka występują dwa zasadnicze rodzaje fotoreceptorów: czopki i pręciki. Czopki są odpowiedzialne za widzenie dzienne – fotonowe, kiedy narząd wzroku jest zaadaptowany do jasności (luminancja otoczenia powyżej 3 cd/m^2), natomiast pręciki są odpowiedzialne za widzenie nocne – skotopowe, kiedy narząd wzroku zaadaptowany jest do ciemności (luminancja otoczenia poniżej $0,003 \text{ cd/m}^2$) [141]. Natomiast w zakresie luminancji otoczenia pomiędzy widzeniem skotopowym a fotonowym ($0,003\text{--}3 \text{ cd/m}^2$) występuje widzenie zmierzchowe – mezopowe, kiedy w widzeniu pośredniczą zarówno czopki, jak i pręciki, przy czym w zależności od poziomu jasności udział czopków i pręcików biorących udział w widzeniu jest różny. Niższy poziom jasności – więcej pręcików, a mniej czopków, wyższy poziom jasności – mniej pręcików, a więcej czopków.

Dzięki systemowi czopkowo-pręcikowemu narząd wzroku człowieka może widzieć w bardzo szerokim zakresie luminancji: $0,000001\text{--}1\,000\,000 \text{ cd/m}^2$ [92, 158] (rys. 2). Zadziwiające jest to, że człowiek potrafi rozróżniać szczegóły przy świetle księżyca jak również przy świetle słonecznym w południe. Tak ogromnego zakresu luminancji nie może pokryć żaden ze współczesnych przyrządów pomiarowych. Z drugiej strony zjawisko oślnienia jest w sposób naturalny związane z dużą różnicą luminancji między tłem a jaskrawym źródłem światła występującymi w polu widzenia człowieka.

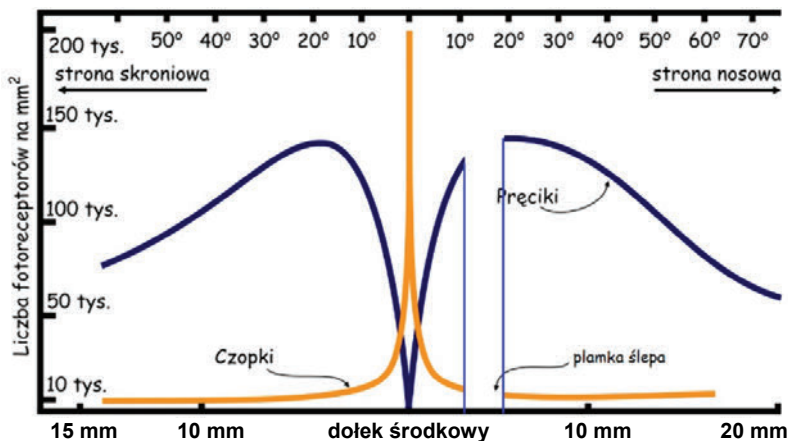


Rys. 2. Zakres dynamiczny luminancji postrzeganych przez system wzrokowy
 Fig. 2. Dynamic range of luminance perceived by human visual system

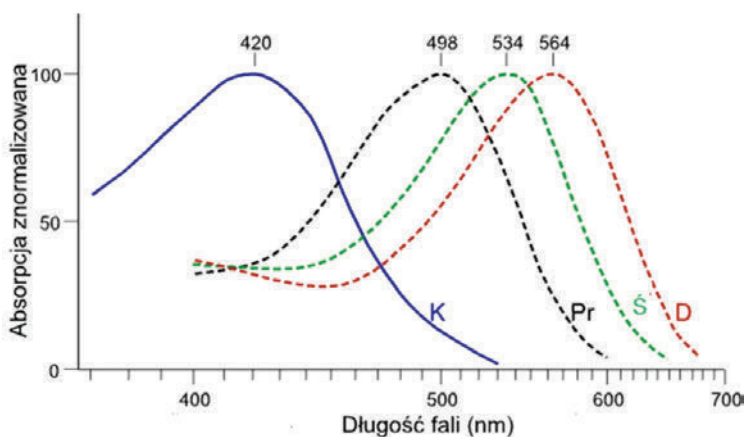
Na siatkówce człowieka znajduje się około 130 milionów fotoreceptorów: 120 milionów pręcików i 6 milionów czopków. Spośród około 6 milionów czopków, mieszczących się na siatkówce, ponad 1 milion mieści się w części centralnej siatkówki (dołku środkowym) (rys. 3), której wielkość pola odpowiada obserwowanemu przedmiotowi o wielkości kątovej równej 1° [128, 170]. Wrażliwość pola recepcyjnego na światło jest uzależniona głównie od wielkości jej powierzchni. Pole recepcyjne, które otrzymuje impuls od dużej liczby receptorów, może być pobudzone przy niższym poziomie natężenia oświetlenia na siatkówce niż pole recepcyjne, które otrzymuje impuls tylko od kilku receptorów [170].

Pręciki są receptorami o bardzo dużej czułości na światło (ok. 100-krotnie większej niż czopki), i choć umożliwiają widzenie przy świetle rozproszonym, to nie umożliwiają ani widzenia ostrego ani widzenia barwnego. Rozmieszczone są przede wszystkim w części peryferyjnej siatkówki (rys. 3). Występuje w nich barwnik z grupy opsyn – rodopsyna z maksimum czułości (absorpcji) o długości fali ok. 498 nm (rys. 4).

Widzenie barwne możliwe jest dzięki czopkom. Rozróżnia się trzy rodzaje czopków, ze względu na ich czułość na różne długości fal promieniowania widzialnego, co wynika z trzech różnych barwników, jakie w nich występują: erytrolabe charakteryzujący się największą czułością na barwę czerwoną (maksimum przy długości fali ok. 564 nm, określane również w literaturze jako długofalowy D), chlorolabe – zieloną (maksimum przy długości fali ok. 534 nm, określane również w literaturze jako średniofalowy – \bar{S}) i cyanolabe – niebieską (maksimum przy długości fali ok. 420 nm, określane również w literaturze jako krótkofalowy – K). Składają się one z białka – opsyny (jodopsyny), w której w zależności od pochłaniania części zakresu widma światła wyróżnia się postacie niebieską, czerwoną i zieloną [149]. Znormalizowane względne widmowe czułości (absorpcji barwników) poszczególnych fotoreceptorów przedstawiono na rys. 4.



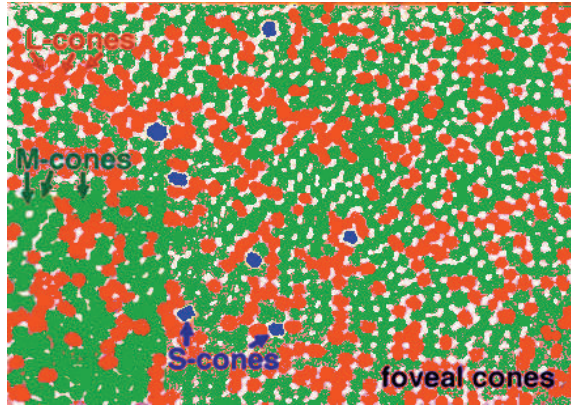
Rys. 3. Rozkład czopków i pręcików na siatkówce oka człowieka na podstawie [78]
 Fig. 3. Distribution of cones and rods in a human retina [78]



Rys. 4. Znormalizowane absorpcje widmowe barwników fotoreceptorów siatkówki
 (K – krótkofalowe czopki, Ś – średniofalowe czopki, D – długofalowe czopki, Pr – pręciki)
 Fig. 4. Standardized spectral absorption of retinal photoreceptors pigment (K – short wavelength cones,
 Ś – medium wavelength cones, D – long wavelength cones, Pr – rods)

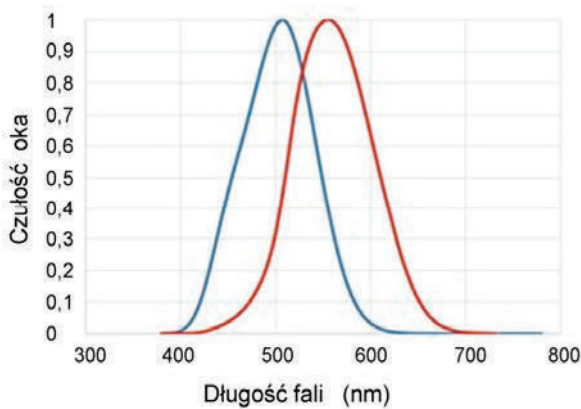
Na uwagę zasługuje fakt, że najwięcej, bo około 64% wszystkich czopków, to czopki czerwone, następnie ok. 32% to czopki zielone, a najmniej, bo tylko ok. 4%, jest czopków niebieskich [92] – rysunek 5. Tak mały udział procentowy czopków niebieskich w stosunku do pozostałych był być może jedną z przyczyn nieuwzględnienia krzywej czułości czopków niebieskich przy ustanawianiu krzywej czułości oka do jasności $V(\lambda)$. Przyjęta przez CIE w 1924 r. krzywa czułości fotopowej $V(\lambda)$ (jak również późniejszych jej modyfikacji) jest aproksymacją czułości widmowej czopków czerwonych i zielonych

[24], czyli tylko dwóch spośród pięciu rodzajów fotoreceptorów siatkówkowych (nie uwzględniono czopków niebieskich, pręcików oraz samoistnych światłoczułych komórek zwojowych – ipRGCs). Aktualnie coraz więcej pojawia się głosów twierdzących, że nie w pełni charakteryzuje ona zakres widmowy czułości oka człowieka na promieniowanie widzialne [129]. Pojawiła się nawet propozycja uniwersalnej krzywej czułości



Rys. 5. Rozkład zielonych, czerwonych i niebieskich czopków w okolicach dołka centralnego. Rozkład barwny opracowany przez autorów na podstawie [92]

Fig. 5. Distribution of green, red and blue cones on retina in the neighborhood of the fovea, authors' color version, based on [92]



Rys. 6. Krzywe czułości oka: fotopowa (czerwona) i skotopowa (niebieska)
Fig. 6. Photopic (red) and scotopic (blue) luminosity functions

oka, która charakteryzuje cały zakres widmowy czułości oka ludzkiego na promieniowanie widzialne i uwzględnia czułości widmowe wszystkich pięciu receptorów siatkówkowych. Mimo kilku modyfikacji krzywej czułości fotopowej $V(\lambda)$ i uzyskanej

nowej wiedzy w zakresie neurofizjologii siatkówki, nadal obowiązująca jest w technice świetlnej, zarówno w projektowaniu oświetlenia, jak i w pomiarach parametrów fotometrycznych oraz oświetleniowych, krzywą czułości oka ludzkiego opracowano w 1924 r. Krzywe czułości fotopowej i skotopowej przedstawiono na rys. 6.

3. OŚWIETLENIE

Zgodnie z terminologią techniki świetlnej [34, 117], oświetlenie jest to stosowanie światła w celu uwidocznienia miejsc, obiektów lub ich otoczenia. Oświetlenie obejmuje sporo działań związanych z przeniesieniem nauki i technologii do praktyki. Źródła światła i oprawy oświetleniowe nie są użyteczne, dopóki nie zostaną zastosowane tak, aby przynosiły korzyści dla ludzi. Oświetlenie drogowe stosowane jest po to, aby pomagało kierowcom dostrzegać zagrożenia. Oświetlenie przemysłowe ma za zadanie pomagać w utrzymaniu wydolności wzrokowej (szybkość i dokładność) pracowników. Oświetlenie w domach ma zapewniać miłe dla oka postrzeganie twarzy, produktów żywnościowych i wyposażenia. Aby oświetlenie spełniało te funkcje, określone parametry oświetleniowe powinny spełniać odpowiednie wymagania. Trudność pracy wzrokowej i znaczenie wzmacniania atrakcyjności wizualnej otoczenia świetlnego determinują wybór źródeł światła i opraw oświetleniowych oraz ich rozmieszczenia w przestrzeni. Wiele badań z udziałem ludzi umożliwiło określenie podstawowych parametrów ilościowych i jakościowych oświetlenia oraz stworzenie wymagań normatywnych ich stosowania, publikowanych w normach oświetleniowych [118, 119, 120, 121]. Wymagania oświetleniowe osobno formułowane są do oświetlania: stanowisk pracy we wnętrzach, stanowisk pracy na zewnątrz, obiektów sportowych czy dróg.

3.1. PARAMETRY OŚWIETLENIA

Oświetlenie można opisać za pomocą następujących parametrów: natężenie oświetlenia, równomierność oświetlenia, rozkład luminancji w polu widzenia, olśnienie, barwa światła, oddawanie barw, migotanie światła.

Natężenie oświetlenia (gęstość powierzchniowa strumienia świetlnego padającego na daną powierzchnię) jest podstawowym parametrem ilościowym. Odzwierciedla ile strumienia świetlnego dociera do danej powierzchni oświetlanej. W projektowaniu i ocenie oświetlenia istotne jest wyznaczenie na określonej powierzchni (obszar zadania, obszar bezpośredniego otoczenia, obszar tła):

- średniego natężenia oświetlenia (zwykle jako średniej arytmetycznej z natężeń oświetlenia w równomiernie rozmieszczonych punktach na danej powierzchni),
- równomierności oświetlenia (iloraz najmniejszej wartości natężenia oświetlenia do wartości średniej natężenia oświetlenia).

Natężenie oświetlenia i jego rozkład w polu widzenia mają duży wpływ na bezpieczeństwo i wydolność wzrokową człowieka. Wymagane wartości natężenia oświetlenia i jego równomierności opracowuje się z uwzględnieniem wygody widzenia, dobrego samopoczucia, charakterystyki zadania wzrokowego i bezpieczeństwa.

Luminancja jest to fizyczna miara jaskrawości i jej wartość odzwierciedla poziom jasności danego obiektu. Luminancja obiektów (o powierzchniach odbijających światło w sposób rozproszony) zależy od ich współczynnika odbicia oraz od natężenia oświetlenia, jakie na nich występuje. Luminancje wszystkich powierzchni obiektów w polu widzenia tworzą układ powierzchni o różnych luminancjach, które nazywa się rozkładem luminancji w polu widzenia. Wpływa on na poziom adaptacji wzroku i wygodę widzenia. Dąży się do zrównoważonego rozkładu luminancji w polu widzenia przez: zapewnienie odpowiednich wartości współczynników odbicia i natężenia oświetlenia na podstawowych powierzchniach w nim występujących, ograniczenie zbyt wysokich luminancji, a także ograniczenie zbyt wysokich i zbyt niskich kontrastów luminancji [118]. Wartość luminancji adaptacji ma szczególne znaczenie podczas oceny olśnienia przykrego.

Olśnienie jest to pewien stan procesu widzenia, podczas którego może dochodzić do odczucia niewygody widzenia (olśnienie przykre) lub ograniczenia zdolności spostrzegania na pewien krótki, ale zauważalny czas (olśnienie przeszkadzające). Może wpływać na pogorszenie cech spostrzegania i prowadzić do spadku wydolności wzrokowej, a nawet wypadku. Stąd ogromne znaczenie ma jego odpowiednie ograniczanie. W miejscach pracy we wnętrzach, na zewnątrz oraz w obiektach sportowych olśnienie może być powodowane bezpośrednio przez wysokie jaskrawości źródeł/opraw oświetleniowych. W tych obszarach zastosowań przyjmuje się za cel ograniczenie olśnienia przykrego, bo wówczas olśnienie przeszkadzające jest tym bardziej ograniczone. Do oceny olśnienia przykrego przyjmuje się różne wskaźniki olśnienia wyznaczane matematycznie na podstawie wartości luminancji źródła olśnienia i luminancji adaptacyjnej, położenia źródła olśnienia w polu widzenia i jego wielkości kątowej. W zależności od rodzaju wykonywanego zadania wzrokowego i jego trudności pracy wzrokowej wymagania odnośnie do ograniczenia olśnienia różnią się. Prace o dużej trudności pracy wzrokowej wymagają bardziej restrykcyjnego ograniczenia olśnienia niż proste prace wykonywane dorywczo, co odzwierciedlone jest przez wartość przyjmowaną do oceny wskaźnika olśnienia.

Istotnym aspektem oświetlenia jest zastosowanie źródeł światła o odpowiednim rozkładzie widmowym światła tak, aby zapewnić odpowiednie rozpoznawanie barw w otoczeniu, odczucie przyjemności przebywania w danym otoczeniu świetlnym oraz podkreślić estetykę pomieszczenia. Z rozkładu widmowego światła wyznacza się dwa parametry: barwę światła (jako temperaturę barwową najbliższą) oraz wskaźnik oddawania barw. Badania psychologiczne wykazały, że im wyższe wartości natężenia oświetlenia w pomieszczeniu, tym wyższa preferowana temperatura barwowa (barwa światła chłodniejsza). Barwy obiektów i ludzkiej skóry powinny wydawać się naturalne co występuje przy dobrym wskaźniku oddawania barw.

Migotanie światła powoduje dekoncentrację i może wywoływać niekorzystne skutki fizjologiczne, jak np. ból głowy, a u osób chorych na epilepsję może inicjować ataki. Wymagania normatywne formułują tylko ogólne zalecenie ograniczenia migotania, bez podania jakiegokolwiek wskaźnika do jego obiektywnego wyznaczenia.

3.2. POMIARY OŚWIETLENIA NA STANOWISKACH PRACY I OBIEKTACH SPORTOWYCH W ODNIESIENIU DO OBOWIĄZUJĄCYCH NORM OŚWIETLENIOWYCH

Wymagania normatywne określone dla stanowisk pracy we wnętrzach, na zewnątrz i dla obiektów sportowych [118, 119, 120] dotyczą tych samych parametrów oświetlenia, które wymieniono w rozdziale 3.2. W przypadku takich parametrów jak natężenie oświetlenia i jego równomierność oraz wskaźnik oddawania barw różnią się wymaganymi wartościami, co wynika z odmiennego charakteru pracy wzrokowej we wnętrzach i na zewnątrz (po zmroku) czy w obiektach sportowych. Zalecenia ogólne dotyczące barwy światła i migotania są tak samo sformułowane. Natomiast zasadnicza różnica dotyczy oceny olśnienia przykrego. W przypadku oceny olśnienia we wnętrzach stosuje się inny wskaźnik olśnienia (*UGR*) niż na zewnątrz i w obiektach sportowych (*GR*).

Współcześnie każdy z przedstawionych parametrów oświetlenia może być wyznaczony pomiarowo. Dotyczy to również migotania, dla którego opracowano w ostatnich latach co najmniej kilka różnych wskaźników, które można wyznaczyć obiektywnie z pomiarów. Jednak dopóki normy oświetleniowe nie podają żadnego określonego wzorem wskaźnika migotania i wymaganych dla niego wartości, to ocena obiektywna nie jest również wymagana, a w konsekwencji nie wykonuje się pomiarów tego parametru. W przypadku pozostałych parametrów oświetlenia sporadycznie wykonuje się pomiar olśnienia, co wynika zarówno z bardzo drogiej aparatury pomiarowej, jak i braku wiedzy, jak należy taki pomiar wykonać prawidłowo. Ponadto nie ma znormalizowanych metod pomiaru, które odnosiłyby się do dwóch podstawowych wskaźników olśnienia: *UGR* i *GR*. Warto nadmienić, że o ile w literaturze można znaleźć informacje o pomiarach wskaźnika olśnienia przykrego wyznaczanego dla wnętrz – *UGR*, to w przypadku wskaźnika olśnienia wyznaczanego dla miejsc pracy na zewnątrz i dla obiektów sportowych przyjęło się dotychczas twierdzić, że jego wyznaczenie pomiarowe nie jest możliwe. W dalszej części rozdziału przedstawiona zostanie autorska metoda wyznaczania wskaźnika *GR* na podstawie pomiarów, co udowadnia, że taka możliwość już istnieje. Warto nadmienić, że omawiane znormalizowane wskaźniki olśnienia opracowane były dla tradycyjnych źródeł światła i nie uwzględniają specyfiki źródeł LED-owych, zwłaszcza w odniesieniu do ich bardzo małej wielkości kątowej.

W tabeli 1 zestawiono podstawowe parametry oświetlenia wraz z zaznaczeniem możliwości ich oceny na podstawie pomiaru i praktycznym wykonywaniem pomiaru na stanowiskach pracy w Polsce. Analiza stanu praktycznego wykonywania oświetlenia jest oceną subiektywną opartą na doświadczeniach i obserwacjach własnych zebra-

nych w czasie ponad 20-letniej praktyki w roli eksperta ds. oświetlenia, audytora technicznego i wykładowcy na kursach specjalistycznych związanych z pomiarami oświetlenia.

Tabela 1. Zestawienie parametrów oświetlenia możliwych do oceny na podstawie pomiaru na stanowiskach pracy we wnętrzach i na zewnątrz
Table 1. List of lighting parameters that can be assessed, based on measurements, at the indoors and outdoors workplaces

Parametr oświetlenia	Wyznaczana wielkość wg PN-EN [118, 119]	Możliwość wykonania pomiaru	Praktyczne wykonywanie pomiaru
Natężenie oświetlenia	E	+	+
Równomierność oświetlenia	U	+	+
Rozkład luminancji	Współczynniki odbicia i natężenie oświetlenia na podstawowych płaszczyznach we wnętrzu	+	Bardzo rzadko
Barwa światła i oddawanie barw	T_c, R_a	+	-
Olśnienie	UGR^*	+	-
	GR^{**}	-/+	-
Migotanie	brak	Nie dotyczy	Nie dotyczy
* dotyczy oświetlenia wewnątrz – PN-EN 12464-1 [118]			
** dotyczy miejsc na zewnątrz budynków – PN-EN 12464-2 [119]			

Dane zestawione w tabeli 1 wskazują, że praktycznie na stanowiskach pracy wykonuje się tylko pomiar natężenia oświetlenia, na podstawie którego wyznacza się średnie natężenia oświetlenia i jego równomierność. Podejmowane przez autorów próby nakłonienia słuchaczy kursów specjalistycznych do wykonywania pomiarów pozostałych parametrów, w tym pomiaru wskaźników olśnienia, pozostają jak dotąd bez echa. Pomiar natężenia oświetlenia jest prosty, a dostępna aparatura pomiarowa – luksomierze, relatywnie tania. Wyznaczenie temperatury barwowej oraz wskaźnika oddawania barw jest możliwe na podstawie pomiaru rozkładu widmowego natężenia napromienienia istniejących w pomieszczeniu źródeł światła. Wymaga to zastosowania przenośnego spektrometriem, który zwykle wyposażony jest już w oprogramowanie, które automatycznie wyznacza parametry radiometryczne i fotometryczne, w tym temperaturę barwową i wskaźnik oddawania barw. Jednak są dość drogie i osoby oceniające oświetlenie wolą korzystać z danych katalogowych źródeł światła, w których znajdują te informacje, lub odczytać te dane z kodu źródła (dotyczy to świetlówek). Dostępne są też mierniki luminancji zarówno analogowe, jak i cyfrowe (matrycowe), jednak ich cena jest znacznie wyższa niż luksomierzy, a normy oświetleniowe nie wymagają bezpośredniego pomiaru luminancji. Pomiar luminancji z wykorzystaniem miernika matrycowego jest natomiast niezbędny do wyznaczania wskaź-

ników olśnienia. Pomiar w celu wyznaczenia wskaźnika olśnienia jest trudny metrologicznie i niewiele osób podejmowało dotąd próby podjęcia się tego wyzwania. Z drugiej strony jest to ciekawy problem nie tylko pod kątem metrologicznym, ale również badawczym.

Praktyczna ocena olśnienia w rzeczywistych warunkach stanowi cel wielu badań naukowych, a jej istotna rola jest także podkreślana w literaturze [69]. Zwraca się uwagę na pomiar poziomu luminancji źródeł decydujących o występowaniu zjawiska olśnienia i problemów związanych z oceną niejednorodności tych źródeł [88]. Z drugiej strony równie istotna jest właściwa analiza luminancji tła z uwzględnieniem lokalnych zmian [86, 90]. Uwzględniając rozwój aparatury pomiarowej, a zwłaszcza matrycowych mierników luminancji, takie wyzwanie zostało podjęte, a wyniki prac związanych z oceną olśnienia przedstawiono w kolejnych rozdziałach niniejszego opracowania

4. OLŚNIENIE

4.1. POJĘCIE OLŚNIENIA

Olśnienie jest to pewien stan i/lub przebieg procesu widzenia, przy którym występuje odczucie niewygodności lub zmniejszenia/utruty zdolności rozpoznawania przedmiotów na skutek niewłaściwego rozkładu luminancji lub nadmiernych kontrastów w przestrzeni lub w czasie. Może być powodowane przez jaskrawe źródła światła występujące w polu widzenia człowieka (olśnienie bezpośrednie) lub przez kierunkowe odbicia źródeł olśnienia od powierzchni odbijających światło w sposób zwierciadlany (olśnienie odbiciowe).

Ilość światła docierająca do oka lub zbyt duży zakres wartości luminancji są głównymi przyczynami powstawania olśnienia. Zbyt duża ilość światła docierająca do oka powoduje występowanie prostych odpowiedzi awersyjnych, takich jak: zwężenie źrenicy, zmrużenie oczu, mruganie czy odwrócenie spojrzenia. Zbyt duży zakres wartości luminancji może powodować dwa rodzaje skutków: odczucie niewygodności (olśnienie przykre) lub ograniczenie zdolności spostrzegania (olśnienie przeszkadzające).

Zgodnie z międzynarodowym słownikiem oświetleniowym opublikowanym przez CIE w 1987 r. (oraz w wersji znowelizowanej w 2011 r. [34]) wyróżnia się dwa główne rodzaje olśnienia: przykre i przeszkadzające z następującymi definicjami:

- olśnienie przykre (ang. *discomfort glare*) – wywołujące niewygodę, bez upośledzenia widzenia obiektów,
- olśnienie przeszkadzające (ang. *disability glare*) – upośledzające widzenie obiektów, bez wywoływania uczucia niewygodności.

W przypadku olśnienia przykrego natychmiast po usunięciu źródła olśnienia niewygodność ustępuje. Zależy ono głównie od luminancji źródła, choć istotne znaczenie ma

też luminancja tła (adaptacji), wielkość kątowna źródła olśnienia oraz miejsce na siatkówce oka, gdzie tworzony jest obraz źródła olśnienia (czyli położenie źródła względem oczu obserwatora). W przypadku odczucia stopnia olśnienia przykrego czas oddziaływania ma istotne znaczenie. Odczuwane subiektywnie olśnienie będzie inne po krótkim czasie ekspozycji na nie, niż po długim i zwykle dłuższy czas ekspozycji wpływa na większe odczucie olśnienia. Ogólnie przyjmuje się, że luminancja źródła musi być większa od $500\text{--}700\text{ cd/m}^2$, aby występowało olśnienie przykre [26].

Olśnienie przeszkadzające wywoływane jest przez zmniejszenie kontrastu subiektywnego (powstanie luminancji zamglenia w oku na skutek rozproszenia w ośrodkach optycznych oka części światła docierającej do oka) i przez niewłaściwą adaptację oka. Jest w dużym stopniu zależne od ilości strumienia świetlnego wchodzącego do oka, natomiast w niewielkim stopniu zależy od czasu jego działania. Efekt olśnienia w postaci pojawiającej się luminancji zamglenia pojawia się praktycznie natychmiast po spojrzeniu na źródło olśnienia. Przyjęto, że luminancja zamglenia jest miarą olśnienia przeszkadzającego [72, 73, 128, 145, 147, 165].

Przedstawiony podział olśnienia jest obowiązujący do dzisiaj. Wskaźniki olśnienia opracowane do oceny olśnienia przykrego i przeszkadzającego zawarte są w normach oświetleniowych wraz z odpowiadającymi im wymaganymi wartościami granicznymi.

4.2. RYS HISTORYCZNY

4.2.1. OLŚNIENIE PRZESZKADZAJĄCE

Pierwsza udokumentowana rozprawa na temat olśnienia powstała w Londynie w 1910 r., kiedy Sir John Parsons przedstawił wiele przykładów sytuacji, gdy ludzie doświadczają olśnienia [113]. Natomiast w latach dwudziestych XX wieku Holladay [72, 73] i Stiles [145, 147] przedstawili wyniki badań dotyczące „efektu maskowania” (efekt zamglenia), który dzisiaj nazywany jest olśnieniem przeszkadzającym. Nieco wcześniej, w 1916 r., Nutting [108] próbował wyjaśniać efekt przeszkadzania na skutek olśnienia, który dzisiaj nazwalibyśmy olśnieniem przykrym. Natomiast rozgraniczenie olśnienia przeszkadzającego od przykrego z omówieniem różnic między tymi dwoma pojęciami wprowadził Stiles w 1929 r. [146]. W swej publikacji wyodrębnił olśnienie przeszkadzające od innych rodzajów olśnienia, a pod pojęciem olśnienie przykre zgromadził co najmniej cztery rodzaje olśnienia, który to fakt umknął uwadze przez wiele lat i został dopiero przywołany w 1999 r. przez Vosa na 24 Sesji CIE [164].

Wyniki badań, dotyczące olśnienia przeszkadzającego uzyskane przez Holladaya [72, 73] oraz Stilesa i Crawforda [147, 148], zostały przedłożone do Międzynarodowego Komitetu Oświetleniowego (CIE) w 1939 r. [164]. Chociaż nie były one nigdy formalnie zaakceptowane jako norma, to były uznane przez międzynarodowe środowisko naukowe i w rezultacie powszechnie poznane na świecie jako Stiles–Holladay formuła do wyznaczania luminancji zamglenia:

$$L_z = \frac{10 \cdot E_o}{\theta^2} \quad (2)$$

gdzie: E_o – natężenie oświetlenia na siatkówce oka pochodzące od źródła olśnienia w lx, θ – kąt pomiędzy linią obserwacji a źródłem olśnienia (w stopniach). Formuła ta stosowana jest tylko dla kątów z przedziału 3° – 30° .

W 1954 roku Fry [54] przedstawił zmodyfikowany wzór na podstawie formuły Stilesa–Hallidaya do wyznaczania luminancji zamglenia [128], który jest powszechnie stosowany do oceny olśnienia przeszkadzającego:

$$L_z = \frac{9,2 \cdot E_o}{\theta(\theta + 1,5)} \quad (3)$$

Pod koniec XX wieku problem oceny olśnienia przeszkadzającego został podjęty głównie przez holenderskich naukowców z TNO Human Factors Research Institute z Johannesem Vos na czele. Na podstawie wielu badań i analiz w 1999 r. opracowano kolejny zmodyfikowany wzór na podstawie formuły Stilesa–Hallidaya, który nazwano ogólnym równaniem olśnienia przeszkadzającego CIE (ang. *CIE General Disability Glare Equation*) lub równaniem dla ogólnego obserwatora olśnienia CIE (ang. *General CIE Glare Observer*) [164, 165], które obowiązuje dla zakresu $0,1^\circ < \vartheta < 100^\circ$:

$$\frac{L_z}{E_o} = \frac{10}{\theta^3} + \left[1 + \left(\frac{Age}{62,5} \right)^4 \right] \cdot \left[\frac{5}{\theta^2} + \frac{0,1 \cdot p}{\theta} \right] + 0,025 \cdot p \quad (4)$$

gdzie: Age – wiek człowieka, p – współczynnik pigmentacji oka (0 – dla czarnych oczu, 0,5 – dla oczu piwnych i 1,2 – dla jasnoniebieskich) [164, 165]

Jak można zauważyć, we wzorze tym uwzględnia się wiek obserwatora oraz pigmentację oczu jako istotne czynniki wpływające na wielkość luminancji zamglenia.

4.2.2. OLŚNIENIE PRZYKRYE

Jak wynika z doniesień literaturowych prace badawcze nad mechanizmami powstawania oraz ocena olśnienia przeszkadzającego znacznie wyprzedziły prace nad olśnieniem przykrym. Być może dlatego, że jak dotąd nie do końca poznano mechanizmy jego powstawania. Olśnienie przykrye pojawia się w takiej samej scenerii otoczenia jak olśnienie przeszkadzające, gdzie w obszarze poza linią widzenia występują zakłócające źródła olśnienia, wpływając na centralną część pola widzenia. Ale podczas, gdy zakłócający efekt w olśnieniu przeszkadzającym polega na efekcie nakładania się (maskowania) luminancji zamglenia na skutek rozproszenia światła w ośrodkach optycznych oka, to przy olśnieniu przykrym zakłócającym efektem jest odwrócenie uwagi. Światło zakłócające „przyciąga” (wabi) oko, podczas gdy bieżące

zadanie wzrokowe wymaga centralnego widzenia. Występowanie w polu widzenia źródeł światła „rzucających się w oczy” nie jest komfortowe [16]. Może dzieje się tak na skutek skłonności fototaktycznej do kierowania spojrzenia w kierunku jaskrawego światła, a może jest to atawistyczny relikw podobny do tego, jaki mają owady lecące ku światłu. Stres spowodowany konfliktem między skłonnością fototaktyczną a zamierzonym unikaniem spojrzenia na światło może tłumaczyć rodzaj niewygodę związany z olśnieniem przykrym [165].

Ujęcie ilościowe olśnienia przykrego, zgodnie z przyjętą przez CIE definicją [34], jest znacznie trudniejsze niż dla olśnienia przeszkadzającego. Dużo łatwiej badanym osobom określić, czy wystąpiła u nich luminancja zamglenia, a tym samym olśnienie przeszkadzające, niż określać subiektywne odczucia niewygodę od łagodnych do ekstremalnie denerwujących, aby ocenić olśnienie przykre. Z drugiej strony ocena subiektywna jest trudna także dlatego, że oczekiwana jest powtarzalność oceny i jednocześnie odpowiednia zrozumiałość stopni odczuć olśnienia na skali i jej „rozdzielczość”. Pogodzenie tych dwóch warunków wymaga kompromisu w przygotowaniu badania – zbyt „szeroka” skala nie zapewni powtarzalności nawet dla doświadczonych odbiorców, zbyt „wąska” utrudni ocenę właściwego poziomu olśnienia. Pierwsza skala do subiektywnej oceny olśnienia przykrego została opracowana w 1950 r. przez Hopkinsona [74, 75] i zawierała tylko cztery poziomy: zaledwie zauważalne (ang. *just perceptible*), jeszcze do przyjęcia (ang. *just acceptable*), już powodujące niewygodę (ang. *just uncomfortable*), już nieznośne (ang. *just intolerable*). Później Hopkinson rozbudował skalę o poziomy „pomiędzy” i dodał dwa poziomy skrajne [76]. W ten sposób powstała skala 9-stopniowa, powszechnie stosowana współcześnie (choć z pewnymi modyfikacjami w nazewnictwie niektórych stopni odczuć olśnienia), przede wszystkim do oceny olśnienia we wnętrzach. Drugą wartą wspomnienia skalą jest 5-stopniowa (rozbudowana także do 9) skala de Boera [40]. Skala ta jest obecnie podstawą do oceny olśnienia w miejscach pracy na zewnątrz oraz w oświetleniu drogowym.

Wielu badaczy w swoich eksperymentach i publikacjach proponowało także inne rozwiązania: Wienold i Christoffersen [168] skala 4-stopniowa, Nazzal, Güler i Onaygil [106] 5-stopniowa, Eble-Hankins [46] 7-stopniowa.

Mniej więcej w tym samym czasie, co powstawała skala odczuć Hopkinsona, w Stanach Zjednoczonych (w latach 1949–1951) opracowano inny system oceny subiektywnej olśnienia przykrego. Polega on na prostej ocenie wygodę/niewygodę widzenia spowodowanej źródłem olśnienia. Określa się minimalną wartość luminancji granicznej – L_g , która już powoduje wystąpienie niewygodę. Wyznaczono w ten sposób wartości graniczne luminancji pomiędzy wygodą a niewygodą – zwane kryterium granicznym, w literaturze anglojęzycznej nazywane *BCD* (ang. *Borderline Between Comfort and Discomfort*) [99]. Badania te uwzględniały wpływ luminancji adaptacji – L_a na *BCD* dla warunków średnich poziomów luminancji, jakie występują we wnętrzach. Wyniki tych badań umożliwiły określenie zależności:

$$L_g = c \cdot L_a^{0,44} \quad (5)$$

gdzie: c – stała, przyjmująca różną wartość w zależności od warunków przeprowadzania badań, a zwłaszcza luminancji tła i charakterystyki badanej grupy; dla oceny luminancji granicznej we wnętrzach należy przyjąć $c = 302$ [99], natomiast do określenia luminancji granicznej podczas jazdy samochodem nocą posłużyć się trzeba stałą $c = 529$ [124].

Równoległe z pracami nad oceną subiektywną oślnienia prowadzono badania zmierzające do opracowania formuł matematycznych opisujących oślnienie przykre. Ze względu na złożoność problemu nie udało się opracować jednej uniwersalnej miary ułatwiającej pomiar oślnienia. Zostało opracowanych wiele różnych wskaźników oceny oślnienia. Najważniejsze i/lub najczęściej stosowane przykłady zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Zestawienie wybranych wskaźników oślnienia
Table 2. List of selected glare indexes

Oznaczenie wskaźnika	Pełna nazwa / twórca	Przeznaczenie
<i>GI</i>	<i>Glare Indeks</i> / Hopkinson 1957 [75]	Wnętrza – oświetlenie sztuczne
<i>DGR</i>	<i>Discomfort Glare Rating</i> / Guth, 1959 [63, 64]	Wnętrza – oświetlenie sztuczne
<i>CGI</i>	<i>CIE Glare Index</i> / Einhorn 1979 [26]	Wnętrza – oświetlenie sztuczne
<i>BGI</i>	<i>British Glare Index</i> [26]	Wnętrza – oświetlenie sztuczne
<i>VCP</i>	<i>Visual Comfort Probability</i> [65]	Wnętrza – oświetlenie sztuczne, drogi
<i>UGR</i>	<i>Unified Glare Rating</i> , CIE 1995 [29]	Wnętrza – oświetlenie sztuczne
<i>GR</i>	<i>Glare Rating</i> , Hargroves, 1986 [67]	Oświetlenie na zewnątrz Obiekty sportowe
<i>W</i>	– / de Boer, 1967 [40]	Oświetlenie drogowe
<i>CBE</i>	<i>Cumulative Brightness Effect</i> / Bennet, 1977 [9, 163]	Oświetlenie drogowe
<i>GCM</i>	<i>Glare Control Mark</i> [25]	Oświetlenie drogowe
<i>TI</i>	<i>Threshold Increment</i> [33, 163]	Oświetlenie drogowe
<i>DGI</i>	<i>Discomfort Glare Index</i> , Wienold 2006 [168]	Wnętrza – oświetlenie dzienne
<i>DGP</i>	<i>Discomfort Glare Probability</i> , Wienold 2006 [168]	Wnętrza – oświetlenie dzienne

Spśród przedstawionych wskaźników do oceny oślnienia praktycznie stosuje się cztery z nich: *UGR* – podczas oceny oślnienia przykrego od oświetlenia sztucznego we wnętrzach, *GR* – podczas oceny oślnienia na zewnętrznych stanowiskach pracy oraz w obiektach sportowych, *DGP* (*DGI*) – podczas oceny oślnienia we wnętrzach od oświetlenia dziennego oraz *TI* – podczas oceny oślnienia na drogach [49, 50, 51, 163]. Wyznaczanie wskaźników oślnienia na podstawie pomiarów rozkładu luminancji wykonuje się dla *UGR*, *DGP* i *TI*. Metodę pomiaru do wyznaczania *GR* opracowali autorzy niniejszego rozdziału.

Analizując formuły matematyczne, opisujące poszczególne wskaźniki, łatwo zauważyć, że decydującym czynnikiem wpływającym na wartość każdego wskaźnika oślnie-

nia jest relacja luminancji źródła do luminancji tła. Jednak różnice definicyjne poszczególnych wskaźników nie umożliwiają w prosty sposób przeliczenia wartości między nimi. Pomimo to znane są równania [26, 21] ułatwiające w przybliżony sposób przeliczać wartości wskaźników VCP i DGR , VCP i BGI , DGR i BGI – zależności (6)–(9).

$$VCP = 279 - 110 \cdot \log(DGR) \quad \text{dla} \quad \begin{array}{l} VCP \in [20,85] \\ DGR \in [55,200] \end{array} \quad (6)$$

Natomiast dla VCP spoza zakresu 20–85

$$VCP = 279 - 110 \cdot \log(DGR) + 350 \cdot (\log(DGR) - 2,08)^5 \quad (7)$$

$$VCP = 124 - 4 \cdot BGI \quad \text{dla} \quad BGI \in [10,26] \quad (8)$$

$$10 \cdot \log(DGR) = 14,1 + 0,36 \cdot BGI \quad (9)$$

Ocena GR dotychczas była problematyczna, gdyż nie można było określić tego wskaźnika na podstawie pomiaru. Wymagania normatywne stawiane oświetleniu na zewnętrznych stanowiskach pracy wskazują na konieczność dokonania oceny olśnienia. Biorąc pod uwagę wyznaczony z powodzeniem na podstawie pomiaru rozkładu luminancji fotometrem matrycowym wskaźnik olśnienia UGR dla wewnątrz podjęto się próby wyliczenia wskaźnika GR z wyznaczonego pomiarowo wskaźnika UGR . Zakładając, że bez względu na to czy człowiek przebywa we wnętrzu, czy na zewnątrz odczuwane olśnienie można nazwać podobnymi odczuciami subiektywnymi. Została więc przeprowadzona analiza formuł wyznaczania wartości wskaźników GR i UGR , a następnie została zaproponowana przez autorów niniejszego opracowania [180] zależność (10) aproksymująca wartość GR na podstawie wyznaczonej pomiarowo wartości UGR .

$$GR = 51,2 + 3UGR + FUN_{CORR}(L_i) \quad (10)$$

przy czym

$$FUN_{CORR}(L_i) = -120 \cdot (L_i \cdot 10^{-5})^{0,09} \quad (11)$$

gdzie L_i jest średnią luminancją źródeł światła (widzianych w punkcie określania olśnienia).

4.3. INNE PROPOZYCJE KLASYFIKACJI OLŚNIENIA

4.3.1. OLŚNIENIE OŚLEPIAJĄCE JAKO SZCZEGÓLNY PRZYPADEK OLŚNIENIA PRZESZKADZAJĄCEGO

Dla celów praktycznych można wyróżnić olśnienie oślepiające (ang. *blinding glare*) jako szczególny przypadek olśnienia przeszkadzającego. Definitywnie jest to takie olśnienie, które powoduje zanik zdolności widzenia na pewien zauważalny czas, przez który żaden obiekt nie może być dostrzeżony. Taki podział ma znaczenie np. podczas

oceny ryzyka zawodowego, kiedy na skutek olśnienia może dojść do wypadku podczas pracy, na skutek zaniku zdolności spostrzegania. Ryzyko duże jest wtedy, kiedy może zaistnieć olśnienie oślepiające od źródeł światła znajdujących się w miejscu pracy [175]. Na potrzeby takiej oceny ryzyka opracowano szacunkową ocenę rodzaju olśnienia, która w prosty sposób może być stosowana w miejscach pracy. Z badań własnych [172] dotyczących wpływu luminancji źródła olśnienia i odpowiadającym jej natężeniu oświetlenia na siatkówkę oka oraz luminancji tła (adaptacji) i odpowiadającej jej wielkości źrenicy przed ekspozycją na olśnienie, określono kryteria szacunkowej oceny rodzaju olśnienia, które zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Kryteria szacunkowej oceny rodzaju olśnienia (przeszkadzające – *P*, oślepiające – *O*) w zależności od luminancji źródła olśnienia i luminancji tła, na podstawie [172]

Table 3. Criteria for the estimation of the type of glare (disability – *P*, blinding – *O*), depending on the luminance of the source of glare and luminance of the background; based on [172]

Luminancja źródła cd/m^2	Luminancja tła, cd/m^2				
	<10	10–100	100–1000	1000–10 000	>10 000
10 000–260 000	<i>P</i>	<i>P</i>	<i>P</i>	<i>P</i>	<i>P</i>
>260 000	<i>O</i>	<i>P</i>	<i>P</i>	<i>P</i>	<i>P</i>
>350 000	<i>O</i>	<i>O</i>	<i>P</i>	<i>P</i>	<i>P</i>
>500 000	<i>O</i>	<i>O</i>	<i>O</i>	<i>P</i>	<i>P</i>
>800 000	<i>O</i>	<i>O</i>	<i>O</i>	<i>O</i>	<i>P</i>
>1 400 000	<i>O</i>	<i>O</i>	<i>O</i>	<i>O</i>	<i>O</i>

4.3.2. SZEŚCIAN OLŚNIENIA VOSA

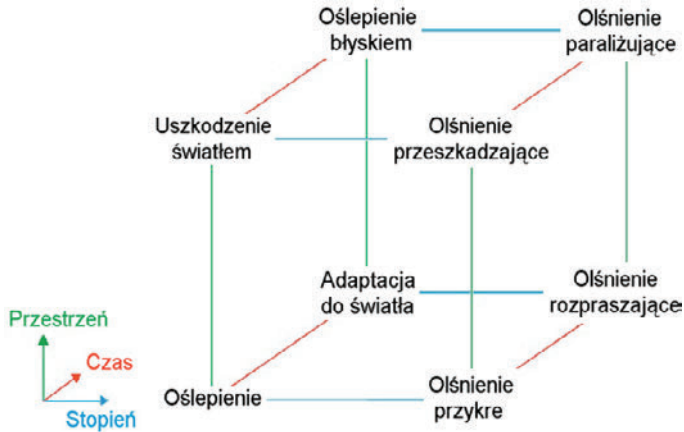
Warto nadmienić o kompletnie odmiennej propozycji kategoryzacji olśnienia zaproponowanej przez Vosa [164]. Na konferencji CIE w 1999 r. przedstawiona została propozycja trójwymiarowego skategoryzowania olśnienia, przyjmując jako poszczególne wymiary (osie) [164]:

- czas oddziaływania (ang. *temporal*) – skutki olśnienia mogą utrzymywać się długo lub krótko,
- przestrzeń oddziaływania (ang. *spatial*) – rozróżnienie skutków miejscowych – tam gdzie pada na siatkówkę światło od źródeł olśnienia do skutków ubocznych, to znaczy w innych miejscach w polu widzenia,
- stopień oddziaływania (ang. *degree*) – stopień skutku oddziaływania olśnienia, np. skutkujące niewygodą czy nawet dokuczające.

Za model takiego podziału zaproponowano sześciąt (rys. 7), którego wierzchołkom przypisano następujące rodzaje olśnienia [164]:

- 1) oślepienie (ang. *dazzle*); przykład: czytanie książki w świetle słonecznym,
- 2) uszkodzenie światłem (ang. *light damage*); przykłady: operacja oka pod mikroskopem, patrzenie bezpośrednio na słońce,
- 3) adaptacja do światła (ang. *light adaptation*); przykład: wyjście na słońce z kina,

- 4) oślepienie błyskiem (ang. *flash blindness*); przykład: błysk eksplozji nuklearnej,
- 5) olśnienie przykre (ang. *discomfort glare*); przykład: nieosłonięta żarówka,
- 6) olśnienie przeszkadzające (ang. *disability glare*); przykład: reflektory samochodowe,
- 7) olśnienie rozpraszające (ang. *distraction glare*); przykład: policyjne światła ostrzegawcze („koguty”),
- 8) olśnienie paraliżujące (ang. *paralysing glare*); przykład: reflektory poszukiwacze-szperacze.



Rys. 7. Sześcian olśnienia, na podstawie [164]
 Fig. 7. The glare cube, based on [164]

Pomimo upływu ponad 18 lat od chwili zaproponowania takiego podziału olśnienia, nadal środowisko techniki świetlnej posługuje się wcześniejszą nomenklaturą i definicjami olśnienia opublikowanymi w 1987 r przez Międzynarodowy Komitet Oświetleniowy CIE [34]. Dodatkowo warto zwrócić uwagę na fakt, że propozycja Vosa z 1999 roku jest pierwszą próbą oceny zjawiska olśnienia z uwzględnieniem czasu oddziaływania. Z doświadczeń użytkowników wynika, że czas oddziaływania olśnienia jest bardzo istotny dla percepcji i komfortu wzrokowego. Niestety badań tego typu od czasu propozycji Vosa nie kontynuowano.

5. OCENA OLŚNIENIA

5.1. SKALA SEMANTYCZNA – SUBIEKTYWNE ODCZUCIA CZŁOWIEKA

Ocena subiektywna olśnienia zawsze stanowiła duże wyzwanie dla badaczy, ze względu na problemy percepcyjne [70]. Celem opracowanych skal semantycznych było pierwotnie ułatwienie prowadzenia oceny subiektywnej olśnienia. Z czasem za-

częły one także służyć do porównania badań prowadzonych w różnych warunkach, a tym samym porównywania wskaźników olśnienia będących miarą zjawiska. Problem różnorodności metod oceny olśnienia, wielu różnych metod opisu matematycznego i wielu całkowicie różnych wskaźników olśnienia jest problemem badaczy, którzy nie potrafią w prosty sposób „zmierzyć” zjawiska. Zwróćmy uwagę na fakt, że z punktu widzenia odbiorcy odczucie olśnienia przykrego czy przeszkadzającego jest nie tylko niezależne, ale także ważniejsze od przyjętych modeli matematycznych. Podjęto zatem badania porównujące różne skale.

W rozdziale 4.2.2 przedstawiono w ujęciu historycznym dwóch głównych twórców skal semantycznych oceny olśnienia: Hopkinsona i de Boera oraz ogólne informacje o ich skalach semantycznych. Natomiast zestawienie obu tych skal oraz przykłady ich modyfikacji przedstawia niniejszy rozdział. Nazwy semantyczne stopni odczucia olśnienia dwóch skal: Hopkinsona i de Boera przedstawiono w tabeli 4 (podano oryginalne nazwy angielskie oraz tłumaczenie własne autorów na język polski).

Tabela 4. Skale semantyczne stopnia olśnienia wg Hopkinsona i de Boera

Table 4. Hopkinson and de Boer semantic glare scales

Skala Hopkinsona z 1972 r. [74, 75, 76]		Skala de Boera z 1967 r. [40, 41]	
Nazwa oryginalna w języku angielskim	Nazwa przetłumaczona na język polski	Nazwa oryginalna w języku angielskim	Nazwa przetłumaczona na język polski
<i>Imperceptible</i>	Niedostrzegalne	–	–
<i>Just perceptible</i>	Zaledwie zauważalne	<i>Just noticeable</i>	Zaledwie dostrzegalne
<i>Perceptible</i>	Zauważalne	<i>Satisfactory</i>	Dostateczne
<i>Just acceptable</i>	Jeszcze do przyjęcia	<i>Just admissible</i>	Jeszcze dopuszczalne
<i>Unacceptable/acceptable</i>	Nie do przyjęcia/do przyjęcia	–	–
<i>Just uncomfortable</i>	Już powodujące niewygodę	<i>Disturbing</i>	Zakłócające
<i>Uncomfortable</i>	Niewygodne	–	–
<i>Just intolerable</i>	Już nieznośne	–	–
<i>Intolerable</i>	Nieznośne	<i>Unbearable</i>	Nie do zniesienia

Skala odczuć subiektywnych Hopkinsona jest bardziej rozbudowana niż skala de Boera. Pierwotna skala Hopkinsona z 1950 r. była modyfikowana przez niego dwukrotnie w 1957 i 1972 r. Natomiast pierwotna skala de Boera z 1967 r. była weryfikowana kilka razy. Jej ostateczny kształt pochodzi z 1973 r. [41]. Zwykle podczas oceny subiektywnej olśnienia dodatkowo możliwa jest ocena odczucia olśnienia jako odczucia pośredniego między jego dwoma sąsiadującymi odczuciami. W tabeli 4 wyróżniono tekst odnoszący się do modyfikacji skali oceny olśnienia opracowanej według skali Hopkinsona [57, 156], polegającej na zamianie odczucia „nie do przyjęcia” na „do przyjęcia” (*Unacceptable – Acceptable*). Semantyczne określenie odczucia najbardziej nasilonego olśnienia skali Hopkinsona może odpowiadać skali de Boera. Taka zmiana była analizowana przez innych badaczy w późniejszych publikacjach [47, 57, 106].

Aby uprościć i ułatwić ocenę, de Boer zaproponował przypisanie wartości liczbowych odpowiednim poziomom w swojej skali: 1 – nie do zniesienia (ang. *unbearable*), 3 – zakłócające (ang. *disturbing*), 5 – jeszcze dopuszczalny (ang. *just admissible*), 7 – dostateczne (ang. *satisfactory*), 9 – zaledwie dostrzegalne (ang. *just noticeable*). W ten sposób powstał najprostszy wskaźnik, będący miarą olśnienia. Wartości 2, 4, 6, 8 są interpretowane jako poziomy pomiędzy poziomami olśnienia z przypisanymi nazwami: np. 2 odpowiada poziomowi pośredniemu między nie do zniesienia a zakłócające. Skala de Boera spotykała się wielokrotnie z krytyką w literaturze [57, 59]. Przede wszystkim zarzucano niejednoznaczność określenia „dostateczne” (ang. *satisfactory*) trudno przystającego do przykrych wrażeń związanych z olśnieniem, a z drugiej strony poziom ten jest trudny opisowo do odróżnienia z poziomem „jeszcze dopuszczalne” (ang. *just admissible*).

Skali semantycznej Hopkinsona również przypisano wartości stałej olśnienia G , którą wyznacza się z opracowanego przez niego w 1957 r. wzoru (16) (patrz rozdz. 5.2.1). Odczucie dyskomfortu (olśnienia przykrego) będzie większe, gdy wartość stałej olśnienia G będzie większa. Przykładowo stosując skalę semantyczną odczuć olśnienia Hopkinsona, odczuciu olśnienia „już nieznośne” odpowiada wartość $G = 600$, a odczuciu „zaledwie zauważalne” $G = 8$ [26].

Poszczególnym stopniom skali odczucia olśnienia przykrego wg skali Hopkinsona przypisano odpowiednie wartości wskaźnika UGR , gdzie wraz ze wzrostem odczuwanego olśnienia wzrasta wartość wskaźnika UGR . Przyjęto, że najmniejsza różnica percepcyjna w odbiorze wrażenia olśnienia będzie odpowiadała zmianie wartości wskaźnika UGR o 1 jednostkę. Natomiast zmiana o 3 jednostki jest największą akceptowaną różnicą dopuszczalną w ocenie olśnienia [29]. Ze względu na trudności opisowe zjawiska w wielu publikacjach pojawiły się modyfikacje nazw poziomów olśnienia skali Hopkinsona, często pod wpływem skali de Boera [10, 59, 178].

W wielu publikacjach pojawiają się różne poziomy olśnienia przypisywane podobnym wartościom UGR [57, 176]. Co więcej, znane są rozbieżności między oceną obiektywną a subiektywną z zastosowaniem odpowiedniej skali [135], szczególnie jeśli mamy do czynienia ze znaczną różnicą wieku osób biorących udział w eksperymentach [178].

Opublikowane są analogiczne przyporządkowania wartości innych wskaźników olśnienia (DGP , CGI , DGI , VCP) do kryteriów skali Hopkinsona, dając podstawę budowania odpowiednich praktycznych skal semantycznych [22, 71, 82, 85].

W artykule Carluccio [22] przedstawiono najszerszą obecnie dostępną analizę znanych wskaźników olśnienia oraz parametrów świetlnych wpływających na ich wartości. Warto zwrócić uwagę na fakt, że, mimo przedstawienia kilkunastu różnych wskaźników, Carlucci nie uwzględnił w ogóle wskaźnika GR ; mimo że jest to jedyny wskaźnik zalecany przez normy międzynarodowe do oceny olśnienia na zewnętrznych stanowiskach pracy. Przedstawione w pracy [22] efekty porównania wartości różnych wskaźników dla tej samej skali semantycznej zostały przedstawione w tabeli 5. Choć wartość UGR dla poziomu „nieznośne” (ang. *intolerable*) wynosi aż 34, to warto pamiętać, że zgodnie z zaleceniami dokumentu CIE 117 [29] praktyczny zalecany

zakres UGR wynosi 10–30. Stąd niemożliwa jest próba symulacji w programach takich jak DIALux sytuacji o bardzo dużym poziomie oślnienia. DIALux podałyby w takim przypadku, że $UGR > 30$, bez konkretnej wartości.

Tabela 5. Zestawienie wartości różnych wskaźników oślnienia dla tej samej 9-stopniowej skali semantycznej Hopkinsona [22], na podstawie [6, 21]

Table 5. Comparison of the values of different glare indexes for Hopkinson 9-grade semantic scale [22], based on [6, 21]

Odczucie oślnienia	BGI	VCP	CGI	DGI	UGR
Niežnośne	31	12	34	30	34
Już niežnośne	28	20	31	28	31
Niewygodne	25	28	28	26	28
Już powodujące niewygodę	22	36	25	24	25
Nie do przyjęcia	19	43	22	22	22
Jeszcze do przyjęcia	16	50	19	20	19
Zauważalne	13	59	16	18	16
Zaledwie zauważalne	10	67	13	16	13
Niedostrzegalne	7	75	10	14	10

Tabela 6. Skala odczuć subiektywnych dla wskaźnika GR [28]

Table 6. The scale of subjective feelings for the GR index [28]

Skala semantyczna odczuć oślnienia dla wskaźnika GR	GF	GR
Nie do zniesienia	1	90
		80
Zakłócające	3	70
		60
		55
Jeszcze dopuszczalne	5	50
		40
Dostrzegalne	7	30
		20
Niedostrzegalne	9	10

Publikacja CIE 112 [28] oraz norma [119] określa wartości wskaźnika GR dla zewnętrznych stanowisk pracy, przypisując je do odpowiednich poziomów na skali oślnienia. Opis zjawiska i odpowiednich parametrów w tym przypadku znajduje się w dokumencie CIE 112 [28]. Warto zwrócić uwagę na fakt, że nie jest precyzyjnie określone w tym przypadku, z jakim oślnieniem mamy do czynienia (przykre czy przeszkadzające). Stosowane są parametry (luminancja zamglenia) takie jak w oślnieniu przeszkadzającym, ale efekty zjawiska omawiane są pod kątem oślnienia przykrego. Opis formuły wyznaczania wskaźnika GR sugeruje oślnienie przeszkadzające, ale

jednocześnie proponowana skala jest oparta na skali de Boera dla olśnienia przykrego. Na tej podstawie w jednym z ostatnich prac [155] można spotkać stwierdzenie, że „wskaźnik GR jest używany do oceny olśnienia przykrego instalacji oświetleniowych dla zewnętrznych obiektów sportowych”. W tabeli 6 przedstawiono skalę semantyczną dla wskaźnika GR wraz z wartościami tego wskaźnika zaproponowanymi przez organizację CIE [28]. Wykorzystano w tym przypadku indeks GF (ang. *Glare Factor*), pośredniczący w obliczeniach wskaźnika GR: $GR = (10 - GF) \cdot 10$. Skala odczuć

Tabela 7. Zaproponowana przez autorów ujednolicona skala dla wskaźników GR i UGR
Table 7. The unified scale for GR and UGR indexes; the authors' proposal

GR	Odczucie olśnienia	UGR
90	Nie do zniesienia (ang. <i>unbearable</i>)	37,5 (*)
77	Nieznosne (ang. <i>intolerable</i>)	34
70	Zakłócające (ang. <i>disturbing</i>)	32
67	Już nieznośne (nng. <i>just intolerable</i>)	31
57	Niewygodne (ang. <i>uncomfortable</i>)	28
50	Jeszcze dopuszczalne (ang. <i>just admissible</i>)	26
48	Już powodujące niewygodę (ang. <i>just uncomfortable</i>)	25
39	Nie do przyjęcia (ang. <i>Unacceptable</i>)	22
31	Jeszcze do przyjęcia (ang. <i>Just acceptable</i>)	19
30	Dostrzegalne (ang. <i>Noticeable</i>)	18,5
24	Zauważalne (ang. <i>Perceptible</i>)	16
17	Zaledwie zauważalne (ang. <i>just perceptible</i>)	13
10	Niedostrzegalne (ang. <i>imperceptible</i>)	10

(*) Wartość wskaźnika UGR dla poziomu „nie do zniesienia” (ang. *unbearable*) wykracza znacznie poza zakres olśnienia przykrego. Zaproponowana tutaj wartość jest czysto teoretyczną ekstrapolacją przeprowadzoną na podstawie analizy tendencji zmian wskaźnika. Podobnie, z pewną dozą dystansu, należałoby traktować wartości powyżej 30. Jednak takie próby zostały przeprowadzone i doświadczenia pokazują, że wartości UGR odpowiadają percepcji człowieka [6, 21].

subiektywnych w tabeli 6 jest opracowana na bazie skali de Boera. Jednak różni się od niej w dwóch miejscach. Zamiast „dostateczne” (ang. *satisfactory*) jest „dostrzegalne” (ang. *noticeable*) oraz zamiast „zaledwie dostrzegalne” (ang. *just noticeable*) jest „niedostrzegalne” (ang. *unnoticeable*). Jednocześnie wartości indeksu *GF* odpowiadają dokładnie wartościom indeksu proponowanego przez de Boera. Można przypuszczać, że w ramach prac komisji CIE skala semantyczna została skorygowana po krytycznych publikacjach [59].

Z punktu widzenia człowieka ocena oślnienia dla różnych warunków oświetleniowych powinna dać takie same wyniki, jeśli jego oceny subiektywne są jednakowe. Zarówno w sytuacji pracy we wnętrzach, jak i w sytuacji pracy na zewnątrz. Trudno jednak oczekiwać takiego rozwiązania, jeśli skale semantyczne stosowane do oceny na zewnętrznych i wewnętrznych stanowiskach nie będą sobie odpowiadały. Analiza zależności opisujących wskaźniki oślnienia dla miejsc pracy we wnętrzach i na zewnątrz przeprowadzona w 2016 roku przez autorów [137] udowodniła, że jest możliwe ujednoczenie skali semantycznych dla *UGR* i *GR* – tabela 7.

Biorąc pod uwagę wartości wskaźników odpowiadające tym samym poziomom semantycznym (i odczuciom człowieka), można zaproponować formuły przeliczeniowe między wartościami różnych wskaźników (12–15).

$$GR = 0,03 \cdot UGR^2 + 1,5 \cdot UGR - 8 \quad (12)$$

$$BGI = UGR - 3 \quad (13)$$

$$VCP = 100,5 - 2,6 \cdot UGR \quad (14)$$

$$DGI = 0,67 \cdot UGR + 7,3 \quad (15)$$

Warto natomiast zwrócić uwagę na fakt, że formuła (10) określająca wartość *GR* na podstawie wartości *UGR* została wyznaczona na podstawie analizy zjawiska i jego opisu matematycznego. Natomiast formuła (12) (podobnie jak (13)–(15) została wyznaczona na podstawie eksperymentów i bazuje na subiektywnych odczuciach ludzi. Oznacza to, że dzięki tym formułom można uzyskać przybliżone wartości indeksu w typowych sytuacjach, ale można spodziewać się błędów w sytuacjach trudnych do oceny, szczególnie gdy odczucia różnych osób będą różne.

Wykorzystując przeprowadzone tutaj rozważania na temat różnych skal oraz opisane formuły przeliczeniowe, autorzy niniejszego opracowania zaproponowali ujednoczoną skalę dla wybranych wskaźników obejmującą zakres oślnienia rozpatrywany doświadczalnie i praktycznie pomiarowo – tabela 8. Jest to najszersza ze znanych w literaturze skal semantycznych i dla takich samych odczuć pracowników ułatwia ujednoczenie skali de Boera i Hopkinsona oraz wartości różnych wskaźników oślnienia. Dodatkową, bardzo praktyczną zaletą tej skali jest uwzględnienie wskaźnika *GR* dla zewnętrznych stanowisk pracy – co powinno ułatwić ocenę oślnienia przy znanych problemach z pomiarem wskaźnika *GR*. Skala ta nie obejmuje dużych wartości *GR*

wykraczających poza zakres olśnienia przykrego, gdyż to wymagałoby dodatkowych badań i potwierdzenia doświadczalnego na dużej grupie osób.

Tabela 8. Ujednolicona skala semantyczna
dla wskaźników *UGR (CGI)*, *GR*, *BGI*, *VCP*, *DGI*
Table 8. The unified semantic scale for indexes: *UGR (CGI)*, *GR*, *BGI*, *VCP*, *DGI*

Odczucie olśnienia	<i>UGR (CGI)</i>	<i>GR</i>	<i>BGI</i>	<i>VCP</i>	<i>DGI</i>
Nieznosne (ang. <i>intolerable</i>)	34	77	31	12	30
Zakłócające (ang. <i>disturbing</i>)	32	70	29	17	28,5
Już nieznosne (ang. <i>just intolerable</i>)	31	67	28	20	28
Niewygodne (ang. <i>uncomfortable</i>)	28	57	25	28	26
Jeszcze dopuszczalne (ang. <i>just admissible</i>)	26	50	23	33	24,5
Już powodujące niewygodę (ang. <i>just uncomfortable</i>)	25	48	22	36	24
Nie do przyjęcia (ang. <i>Unacceptable</i>)	22	39	19	43	22
Jeszcze do przyjęcia (ang. <i>Just acceptable</i>)	19	31	16	50	20
Dostrzegalne (ang. <i>Noticeable</i>)	18,5	30	15,5	52	19,5
Zauważalne (ang. <i>Perceptible</i>)	16	24	13	59	18
Zaledwie zauważalne (ang. <i>just perceptible</i>)	13	17	10	67	16
Niedostrzegalne (ang. <i>imperceptible</i>)	10	10	7	75	14

5.2. WSKAŹNIKI OLŚNIENIA

5.2.1. UOGÓLNIONY WSKAŹNIK OLŚNIENIA

Potrzeba obiektywnej oceny olśnienia doprowadziła do rozpoczęcia badań nad miarą, która umożliwi ocenę olśnienia w sposób obiektywny, powtarzalny i niezależny od warunków oświetleniowych. Zarówno Hopkinson [75], jak de Boer [40] oraz inni badacze z tego okresu zaproponowali własne formuły do oceny. Hopkinson [75] wprowadził tzw. stałą olśnienia G , która określa ogólną zależność olśnienia przykrego od takich parametrów, jak luminancja źródła olśnienia L , luminancja tła L_B , wielkość

kątowa źródła ośnienia ω , położenie źródła ośnienia względem obserwatora θ . Formuła (16) wyznaczająca G stała się podstawą do później opracowanych wskaźników ośnienia przykrego dla wnętrza i została opublikowana w 1988 r. przez CIE [26]. Współcześnie traktowana jest jako uogólnienie znanych wskaźników ośnienia [165].

$$G = \frac{L^a \cdot \omega^b}{L_B^c \cdot f(\theta)} \quad (16)$$

gdzie: $f(\theta)$ – złożona funkcja określająca kątowe odchylenie źródła ośnienia od kierunku obserwacji, a , b , c – wykładniki potęgowe charakteryzujące stopień wpływu danego czynnika.

Odczucie dyskomfortu (ośnienia przykrego) będzie większe, gdy wartość stałej ośnienia G będzie większa. Zgodnie ze wzorem (16) większe odczucie ośnienia będzie występowało, gdy:

- obraz źródła ośnienia na siatkówce będzie znajdował się blisko dołka środkowego (czyli kiedy θ – kątowe odchylenie położenia źródła ośnienia od kierunku obserwacji będzie niewielkie);
- kiedy obraz źródła ośnienia będzie duży (czyli kiedy kąt przestrzenny ω , w którym źródło ośnienia jest obserwowane, jest duży lub kiedy występuje kilka źródeł ośnienia);
- kiedy natężenie oświetlenia w miejscu powstawania obrazu jest duże w porównaniu z natężeniem oświetlenia na pozostałej części siatkówki (czyli kiedy luminancja źródła ośnienia L jest dużo większa od luminancji tła L_B , na którym to źródło się znajduje).

W celu uzyskania wygodnych w użyciu wartości liczbowych stała ośnienia G została wyrażona za pomocą tzw. wskaźnika ośnienia GI , który obliczany jest ze wzoru

$$GI = 10 \cdot \log_{10} G \quad (17)$$

Badania prowadzone przez Schmidta–Clausena i Bindelsa [140] doprowadziły do zaproponowania zależności (18), która ułatwia wyznaczenie wartości wskaźnika W dopasowanego do skali de Boera (9-stopniowej) na podstawie natężenia oświetlenia przy oku obserwatora E_B , luminancji tła L_B i kąta odchylenia źródła ośnienia od linii obserwacji θ .

$$W = 5 - 2 \log_{10} \frac{E_B}{C_{poo} \cdot \left[1 + \sqrt{\frac{L_B}{C_{pL}}} \right] \cdot \theta^{0,46}} \quad (18)$$

gdzie: W – wartość wskaźnika ośnienia na skali de Boera, C_{poo} – stała wynosząca 0,003 określana w: lx \times min^{-0,46}, C_{pL} – stała wynosząca $4,0 \times 10^{-2}$ (cd/m²), θ – kąt odchylenia źródła ośnienia od linii obserwacji, w min.

W 2012 roku Totzauer i Khanh zakwestionowali poprawność formuły (18) w odniesieniu do współczesnych źródeł światła LED [85].

Warto zwrócić uwagę na fakt, że formuła (18) nie jest jedyną, która przyporządkowuje wartość wskaźnika poziomowi olśnienia w taki sposób, że jest to bezpośrednio zgodne z wartościami zaproponowanymi przez de Boera w skali semantycznej. Bullough, Brons i Rea zaproponowali wskaźnik DG olśnienia przykrego dla zewnętrznych instalacji oświetleniowych [17] (skorygowany w 2011 r. [19]). Przeliczenia do skali de Boera zostały opublikowane w [101]. Zgodność wartości ze skalą de Boera wykazuje także wskaźnik GCM (ang. *Glare Control Mark*) opracowany w latach 60. ubiegłego stulecia w Holandii [25].

5.2.2. WSKAŹNIK UGR

Wskaźnik olśnienia przykrego dla stanowisk pracy we wnętrzach UGR (ang. *Unified Glare Rating*) został zdefiniowany w dokumentach CIE na podstawie badań doświadczalnych [26, 29]. Zasady stosowania opisano w normie [118]. Sposób wyznaczenia wartości UGR podaje formuła (19).

$$UGR = 8 \log_{10} \left(\frac{0,25}{L_u} \sum_i \frac{L_i^2 \omega_i}{P_i^2} \right) \quad (19)$$

gdzie: L_u – luminancja tła (cd/m^2), L_i – luminancja i -tego źródła (jaskrawego obszaru) w kierunku oka obserwatora (cd/m^2), ω_i – kąt bryłowy i -tego jaskrawego obszaru widziany z punktu, w którym znajduje się oko obserwatora (sr), P_i – wskaźnik położenia (indeks Gutha) dla i -tego obszaru (źródła), odnoszący się do położenia źródła względem linii wzroku, wskaźnik ten jest stabilizowany [29].

Stosowanie wskaźnika UGR jest dobrze udokumentowane. Wyznaczenie jego wartości wymaga znajomości odpowiednich luminancji źródeł olśnienia i tła, nie wymaga dodatkowych przeliczeń ani innych operacji matematycznych.

5.2.3. WSKAŹNIK GR

Wskaźnik olśnienia dla stanowisk pracy na zewnątrz i dla obiektów sportowych GR (ang. *Glare Rating*) jest opisany w normie [119]. Ogólne zalecenia dotyczące oświetlenia zewnętrznych miejsc pracy zostało przedstawione w dokumencie CIE [30]. Natomiast ograniczenia związane ze światłem przeszkadzającym (także z olśnieniem) dla instalacji oświetlenia zewnętrznego w dokumencie CIE [33]. W dokumencie CIE [28] znajdziemy wytyczne związane z wyznaczaniem olśnienia na dużych przestrzeniach sportowych.

Sposób wyznaczania wartości UGR podaje formuła (20).

$$GR = 27 + 24 \log_{10} \left(\frac{L_{vf}}{L_{ve}^{0,9}} \right) \quad (20)$$

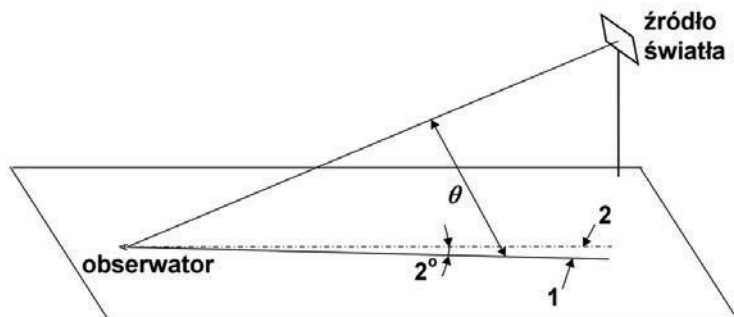
gdzie: L_{vl} – luminancja dekontrastująca (zamglenia) całkowita (cd/m^2), wywołana przez instalacje oświetleniową i będąca sumą luminancji dekontrastujących wytworzonych przez każdą indywidualną oprawę oświetleniową L_{vi} ($L_{vl} = L_{v1} + L_{v2} + \dots + L_{vn}$) · L_{ve} – luminancja dekontrastująca (zamglenia) równoważną środowiska (cd/m^2).

Luminancja zamglenia jest związana ze zmniejszeniem subiektywnego kontrastu (rozdz. 4.1) i nie jest wielkością, która może być bezpośrednio wyznaczona pomiarowo. Z tego względu należy wykorzystać dodatkowe zależności.

Luminancja dekontrastująca (zamglenia) pojedynczego źródła światła może być wyznaczona na podstawie (21).

$$L_{vi} = 10 \cdot E_{eyei} \cdot \theta_i^{-2} \quad (21)$$

gdzie: E_{eyei} – natężenie oświetlenia przy oku obserwatora w płaszczyźnie prostopadłej do linii wzroku, przy czym linia wzroku w tym przypadku jest skierowana w dół (2° poniżej linii poziomej). Ponieważ L_{vi} jest związane z indywidualnym źródłem oślnienia, więc rozpatrujemy E_{eyei} pochodzące od indywidualnego źródła światła (od indywidualnej oprawy). θ_i – kąt między linią wzroku obserwatora i kierunkiem światła padającego od indywidualnego źródła światła. Zakres kątów obejmuje przedział $1,5\text{--}60^\circ$ [28, 119]. Definicja kąta θ została przedstawiona na rysunku 8 [39, 119]. Wartość kąta w formule 21 jest wyrażona w stopniach [28].



Rys. 8. Definicja kąta θ : 1 – linia wzroku (2° poniżej linii poziomej), 2 – linia pozioma [30]

Fig. 8. Definition of the angle θ : 1 – the line of sight (2° below the horizontal line), 2 – the horizontal line [30]

Natężenie oświetlenia przy oku obserwatora od indywidualnego źródła światła może zostać wyznaczone na podstawie (22) [122].

$$E_{eyei} = L_{ai} \cdot \omega_i \cdot \cos \theta_i \quad (22)$$

gdzie: L_{ai} – średnia luminancja indywidualnego źródła oślnienia i , ω_i – kąt bryłowy, w jakim to źródło jest widziane.

Zastosowanie współczesnych mierników matrycowych uwzględnia mapę luminancji dla każdego źródła, łącznie z odpowiednimi kątami.

Po założeniu, że odbicie środowiska jest całkowicie rozproszone, luminancja dekontrastująca (zamglenia) równoważna środowiska (L_{ve}) może być obliczona ze wzoru (23) [119].

$$L_{ve} = 0,035 \rho \cdot E_{hav} \cdot \pi^{-1} \quad (23)$$

gdzie: ρ – średni współczynnik odbicia, E_{hav} – średnie horyzontalne natężenie oświetlenia w strefie.

W pracy [67] zaproponowany jest także uproszczony wzór na luminancję dekontrastującą (zamglenia) równoważną środowiska – formuła (24).

$$L_{ve} = 0,035 \cdot L_b \quad (24)$$

gdzie: L_b – średnia luminancja tła (otoczenia).

Formuła (25), mimo że uproszczona, jest powszechnie stosowana w systemach pomiarowych, gdzie dzięki pomiarowi matrycowemu można wyznaczyć rozkład luminancji z dowolnego punktu pomiarowego. Jednocześnie nie ogranicza pomiaru do powierzchni rozpraszających tak jak formuła (23).

Analizując zalecenia w dokumentach CIE i normach międzynarodowych, dotyczące olśnienia na zewnętrznych stanowiskach pracy, można stwierdzić dość specyficzne przedstawianie problemu. Wydaje się, że opisywane tam warunki powstawania olśnienia są najbliższe oświetleniu terenów sportowych (stadiony, boiska do uprawiania różnych dyscyplin). W praktyce porównywalne tereny przemysłowe, gdzie może powstawać zjawisko olśnienia w analogiczny sposób, to typowe tereny magazynowe na świeżym powietrzu (składowanie kontenerów, doki, porty, składowanie węgla, materiałów budowlanych itp.). Jeśli jednak weźmiemy pod uwagę prace montażowe, budowlane, prace serwisowe na terenach przemysłowych, a szczególnie czynności wykonywane na zewnątrz, ale w warunkach częściowo zadaszonych lub zabudowanych (stacje benzynowe, obsługa małych sklepów, warsztaty remontowe itp.), to narażenie pracownika na olśnienie w tych warunkach jest zdecydowanie inne niż na boisku piłkarskim. Norma [119] zawiera wymagania oświetleniowe dla różnych stref pracy, zadań i czynności. Lista ta obejmuje także zalecane wartości wskaźnika GR . Jednak sposób liczenia tego wskaźnika jest identyczny i niezależny od wykonywanej pracy. Wydaje się, że nie zawsze jest to zgodne z oczekiwaniem, biorąc pod uwagę przytoczone przykłady.

Warto zastanowić się nad źródłami takiego podejścia do problemu oceny olśnienia dla stanowisk pracy na zewnątrz. Pierwsze analizy dotyczące oświetlenia dużych przestrzeni dotyczą oświetlenia boisk piłkarskich [157, 162] i pochodzą z lat 1982–1983. Zaproponowano w nich ilościową miarę olśnienia, która została opisana w dokumencie CIE [28], jako wskaźnika GF . Analizę olśnienia z wykorzystaniem GF przepro-

wadził Hargroves dla oświetlania kortów tenisowych [67]. Praca ta jest pierwszą publikacją, w której pojawia się wskaźnik *GR*. Został on wprowadzony 25 listopada 1985 r. przez Komitet Techniczny TC 5-04 organizacji CIE. Dobre udokumentowanie analiz oświetlenia dla dużych przestrzeni sportowych było powodem wykorzystania ich w pierwszych (i późniejszych) dokumentach CIE [30] poświęconych oświetleniu na zewnętrznych miejscach pracy. W ten sposób zaadaptowano zarówno wskaźnik *GR*, jak i metody oceny oświetlenia stosowane w sporcie. Ponieważ warunki oświetlania terenów sportowych nie do końca pokrywają się z oświetleniem miejsc pracy, to w ostatnich latach pojawiają się próby nowego podejścia do oceny oświetlenia. Przykładem może być propozycja nowego wskaźnika oświetlenia *DG* dla zewnętrznych miejsc pracy zaproponowana przez naukowców z Rensselaer Polytechnic Institute [142], który wykorzystuje pomiary natężenia oświetlenia i również związany jest ze skalą de Boera. Ograniczeniem tego modelu jest to, że praktycznie można go stosować dla jednego źródła oświetlenia, co w sytuacji oceny oświetlenia na zewnętrznych stanowiskach pracy jest nie do zaakceptowania.

Mimo że wskaźnik *UGR* jest zgodnie z normą przeznaczony do oceny oświetlenia na stanowiskach pracy we wnętrzach, to w szczególnych przypadkach można go zastosować także do oceny oświetlenia na stanowiskach zewnętrznych. Można pokazać wiele przykładów zewnętrznych miejsc pracy (zadaszenia, praca w ograniczonej przestrzeni typu doki itp.), gdzie warunki oświetleniowe narażenia na oświetlenie są bardzo zbliżone do warunków wewnętrznych. Dla pracownika nie jest istotny typ użytego wskaźnika, istotna jest natomiast właściwa ocena warunków pracy. Autorzy tego opracowania wielokrotnie prowadzili próby w tym zakresie. Po właściwej interpretacji wyników, próby te umożliwiły poprawną (zgodnie z odczuciami subiektywnymi) ocenę poziomu oświetlenia [134].

5.3. INNE METODY OCENY OŚWIETLENIA

5.3.1. SYMULACJE KOMPUTEROWE DO OBLICZEŃ WSKAŹNIKÓW OŚWIETLENIA

Powszechnie stosowana metoda oceny oświetlenia dotyczy etapu projektowania oświetlenia z zastosowaniem specjalistycznego oprogramowania do projektowania oświetlenia, jak np.: Relux [130] czy DIALux [43]. Najpopularniejszym programem jest DIALux, który dostępny jest bezpłatnie, a producenci opraw dostarczają pliki z danymi fotometrycznymi opraw, które są łatwo implementowane do obliczeń w tym programie.

Analiza rozchodzenia się światła w takich programach jest prowadzona metodami symulacyjnymi [115]. Najczęściej używana jest metoda energetyczna (*radiosity*) [38, 44] lub rzadziej metoda śledzenia promieni (*raytracing*) [60, 150]. Warto zwrócić uwagę na to, że metoda *radiosity* w znakomity sposób symuluje rozchodzenie się światła w środowisku, gdzie występują odbicia (i/lub załamania) światła w postaci rozproszonej lub przynajmniej kierunkowo-rozproszonej. Natomiast problemem jest

symulacja odbić zwierciadlanych. Udokumentowane są problemy wyznaczania rozkładu luminancji w DIALuxie, gdy zaprojektowano oświetlenie pośrednie z wykorzystaniem odbicia zwierciadlanego [112].

Wyznaczenie odpowiedniego wskaźnika oślnienia jest związane z przeznaczeniem projektowanego oświetlenia, uwzględniając podział na: wnętrza, obiekty sportowe, przestrzenie na zewnątrz budynków czy drogi. Symulacyjnie wyznaczane są zatem takie wskaźniki oślnienia, jak: *UGR*, *GR* i *TI*, przy czym *TI* (ang. *Threshold Increment*) dotyczy oślnienia przeszkadzającego, a nie przykrego. Punktem wyjścia do rozpoczęcia obliczeń symulacyjnych jest wprowadzenie w programie wielu danych dotyczących m.in:

- pomieszczenia/przestrzeni projektowanej (wymiary geometryczne, właściwości odbiciowe powierzchni,
- charakterystyki opraw oświetleniowych (dane geometryczne i fotometryczne oprawy),
- liczba i rozmieszczenie opraw w pomieszczeniu/przestrzeni,
- położenie obszarów zadania,
- położenie obserwatora (podczas wyznaczania wskaźników oślnienia).

Po wprowadzeniu wszystkich niezbędnych danych dokonuje się obliczeń symulacyjnych, w wyniku których otrzymuje się zestaw wyznaczonych obliczeniowo parametrów oświetlenia w projektowanej przestrzeni, w tym wskaźnika oślnienia. Wtedy gdy analiza wyników obliczeń wskazuje na przekroczenia wartości wskaźnika oślnienia powyżej wartości wymaganych w odpowiedniej normie oświetleniowej, wówczas dokonuje się zmian w projekcie (danych wejściowych) tak, aby w efekcie spełnione były wymagania normatywne dla wszystkich parametrów oświetlenia.

5.3.2. METODY OPARTE NA ZASADZIE OGRANICZANIA LUMINANCJI (ANG. *LUMINANCE LIMITING SYSTEMS*)

Rozróżnia się dwie grupy metod opartych na zasadzie ograniczenia luminancji [26, 170], które polegają na: 1) określeniu wartości granicznych luminancji, 2) określeniu wartości granicznych rozkładu luminancji.

Ad 1) Metody oparte na określaniu wartości granicznych luminancji stosuje się w przypadkach, gdy zastosowane oprawy mają w przybliżeniu stały (jednakowy) rozkład luminancji w przestrzeni. Są to oprawy z kloszem rozpraszającym, a luminancje tych opraw na ogół nie przekraczają $15\ 000\ \text{cd/m}^2$, natomiast luminancje tych opraw w krytycznej strefie kątowej są w przybliżeniu takie same. Wówczas możliwe jest wyznaczenie dopuszczalnej wartości luminancji źródła oślnienia L_{zr} , wstawiając odpowiednie dane do wzoru (25)

$$L_{zr} = q \sqrt{\frac{G \cdot L_t^c \cdot f(\theta)}{\omega^b}} \quad (25)$$

gdzie L_t to luminancja otoczenia.

Przykładem metody oceny olśnienia opartej na zasadzie ograniczenia wartości luminancji jest metoda dopuszczalnych luminancji [5]. Podstawą tej metody jest ograniczenie olśnienia bezpośredniego przez zmniejszenie luminancji opraw w wybranych strefach pola widzenia. Podaje się maksymalne dopuszczalne wartości luminancji opraw w określonych kierunkach obserwacji oraz minimalne dopuszczalne wartości kąta ochrony oprawy (a w przypadku opraw ze źródłami o dużej mocy – minimalną wysokość zawieszenia). Jeśli dla wybranej oprawy uzyskane wartości są mniejsze od podanych tabelarycznie, to przyjmuje się, że poziom olśnienia bezpośredniego nie przekroczy poziomu uznanego za dopuszczalny [170].

Ad 2) Metody oparte na określaniu wartości granicznych rozkładu luminancji stosuje się zwłaszcza w przypadkach, gdy zastosowane oprawy nie mają stałego (jednakowego) rozkładu luminancji w przestrzeni. Są to oprawy z kloszem pryzmatycznym lub innymi osłonami, a luminancje tych opraw w krytycznej strefie katowej nie są jednakowe. Dobrze zaprojektowane oprawy charakteryzują się tym, że wraz ze zwiększeniem kąta rozsyłu światła powyżej 45° luminancja oprawy stopniowo maleje [26, 170].

Jedną z metod oceny olśnienia opartych na zasadzie ograniczenia wartości granicznych rozkładu luminancji jest metoda krzywych luminancji granicznych [5]. Wyznaczono krzywe graniczne wartości luminancji opraw dla dowolnej stałej olśnienia G i różnych założonych wartości natężenia oświetlenia. Poszczególным stopniom olśnienia przyporządkowano określone klasy jakości: A, B, C, D, E, gdzie klasa A oznacza największy stopień ograniczenia olśnienia. Za odniesieniowe wartości natężenia oświetlenia przyjęto 250, 500, 1000 i 2000 lx, dla których poszczególnych klas jakości wyznaczono maksymalne dopuszczalne wartości luminancji opraw w wyodrębnionych strefach.

5.3.3. METODA KĄTÓW OCHRONY (ANG. *SHIELDING ANGLE SYSTEM*)

Metody oparte na określaniu wartości kątów ochrony stosuje się w przypadkach, gdy zastosowane oprawy mają zabezpieczenie przeciwolśnieniowe, a zwłaszcza te, które mają zainstalowane wyładowcze źródła światła o dużej mocy.

W tych przypadkach o olśnieniu przykrym decyduje raczej strumień świetlny emitowany przez oprawę niż jej luminancja. Metoda ta jest proponowana w normie oświetleniowej PN-EN 12464-1 [118], jako uzupełniająca do wyznaczanego wskaźnika olśnienia *UGR*. Podaje minimalne kąty ochrony opraw w zależności od luminancji źródła zainstalowanego w oprawie.

5.3.4. METODA DWÓCH REGUŁ

Jest to metoda, która powstała w wyniku połączenia metody krzywych luminancji granicznych oraz metody kątów ochrony. Metoda ta była obowiązującą w Polsce od 1984 do 2004 r., kiedy obowiązywała norma oświetleniowa PN/E 02033 [116]. Tworzą ją dwie reguły [5, 27]:

Reguła 1: Wszystkie typy opraw powinny mieć – w czterech kierunkach określonych kątami 55° , 65° , 75° i 85° względem pionu – wartości luminancji nie większe od wartości granicznych, w zależności od rodzaju oprawy (jasne, ciemne boki), klasy ograniczenia olśnienia (klasa I, II i III, gdzie klasa I największe ograniczenie olśnienia) oraz przedziałów poziomów natężenia oświetlenia (poniżej 500 lx i powyżej 750 lx).

Reguła 2: Oprawy otwarte od dołu powinny mieć kąty ochrony nie mniejsze od kątów granicznych, podanych w zależności od rodzaju pomieszczenia (czynności). Jednocześnie oprawy ze źródłami o luminancji 20 000–50 000 cd/m² powinny być umieszczone na wysokościach nie mniejszych od wysokości granicznych, podanych w zależności od strumienia świetlnego źródła światła w oprawie.

5.3.5. SUBIEKTYWNA OCENA OLŚNIENIA

W rozdziale 4.2.2 przedstawiono w ujęciu historycznym dwie metody subiektywnej oceny olśnienia:

- granicznej wartości luminancji pomiędzy wygodą a niewygodą – BCD (ang. *Borderline Between Comfort and Discomfort*).
- z wykorzystaniem skali semantycznej odczucia olśnienia Hopkinsona i de Bopera

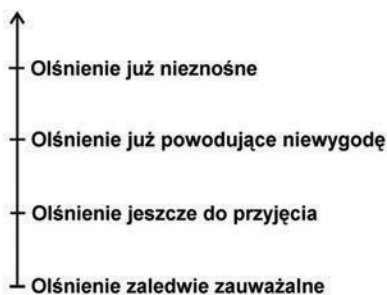
Metoda BCD posłużyła do opracowania popularnej w Stanach Zjednoczonych metody oceny olśnienia określającej prawdopodobieństwo wystąpienia wygody widzenia – VCP (ang. *Visual Comfort Probability*). Wykorzystując wyniki badań, w których ludzie oceniali wystąpienie wygody widzenia w danym systemie oświetlenia określono wartości prawdopodobieństwa wystąpienia wygodny widzenia w odniesieniu do całej populacji. Stosowanie systemu VCP w celu porównania wyników dla różnych opraw oświetleniowych wymaga spełnienia kilku znormalizowanych warunków dotyczących m.in.: wartości początkowego natężenia oświetlenia, wartości współczynników odbicia sufitu, ścian i podłogi, wysokości zawieszenia opraw, wymiarów pomieszczenia, równomiernego rozmieszczenia opraw oświetleniowych i miejsca obserwacji. Przyjmuje się, że dla wartości $VCP \geq 70$ olśnienie przykre praktycznie nie występuje [128, 170].

Natomiast metoda subiektywnej oceny olśnienia oparta na skalach semantycznych odczucia olśnienia wykorzystana była w badaniach własnych autorów. Zastosowanie takich skal nie jest sprawą prostą, dlatego, że istnieją nazwy odczuć olśnienia. Pierwszą trudnością w zastosowaniu takiej skali jest właściwe przetłumaczenie określeń angielskich, aby były potocznie zrozumiałe. Drugim ważnym aspektem jest odpowiedni trening osób badanych przed przystąpieniem do oceny odczucia olśnienia, zwłaszcza gdy ich ocena ma służyć do weryfikacji wyznaczonych z pomiarów wartości wskaźnika olśnienia, jak np. *UGR*. Biorąc pod uwagę subtelne różnice w nazew-

nictwie odczuć i indywidualne rozumienie nazw tych odczuć, konieczne jest omówienie skali z każdym badanym. Wymaga to zarówno omówienia z podaniem przykładu każdego punktu na skali odczuć i/lub zamodelowanie w praktyce sytuacji, które mogą odpowiadać tym punktom skali. Jeśli ocena ta ma służyć wyciąganiu wniosków naukowych, to każdy ankietowany powinien dokonywać oceny w tych samych warunkach oświetleniowych, przy tym samym położeniu oczu względem opraw oświetleniowych oraz po takim samym czasie ekspozycji na oślnienie. W takich sytuacjach ważne jest zapewnienie jednolitości cech grupy pod względem wieku, stanu narządu wzroku i indywidualnej wrażliwości na oślnienie. Na ocenę oślnienia mogą mieć również wpływ różnice kulturowe oraz rasa (zwłaszcza ma to zastosowanie do rasy żółtej, ze względu na odmienne osadzenie oczu i ich osłonięcie przez powieki).

5.3.6. PRAKTYCZNE ZASTOSOWANIE SKALI HOPKINSONA DO WERYFIKACJI WYZNACZONYCH Z POMIARU WARTOŚCI *UGR*

Praktyczne wykorzystanie skali Hopkinsona było w ramach projektu, którego celem było m.in. przeprowadzenie badań wpływu oślnienia na stopień odczucia oślnienia u osób starszych [181]. Dla istniejącej instalacji oświetlenia wykonano obliczenia symulacyjne wskaźnika *UGR* z zastosowaniem programu DIALux. Wyznaczono wzdłuż linii środkowej pomieszczenia punkty położenia oka obserwatora, w których występowały różne wartości wyznaczonego obliczeniowo wskaźnika oślnienia *UGR* (zakres zmian wartości *UGR* wynosił 14–22, w zależności od odległości od źródła oślnienia). Na podstawie przypisanych wartości *UGR* do odpowiednich odczuć oślnienia wg skali Hopkinsona uzyskano zakres wielkości oślnienia zawierający się między ocenami od „zaledwie zauważalne” do „już powodujące niewygodę”. Znormalizowana skala odczuć subiektywnych została przedstawiona w formie graficznej jako strzałka z naniesionymi punktami odpowiadającymi kolejnym znormalizowanym odczuciom oślnienia, począwszy od oślnienia „zaledwie zauważalnego” ($UGR = 10$), poprzez oślnienie „jeszcze do przyjęcia” ($UGR = 16$), powodujące już niewygodę ($UGR = 22$) do oślnienia „nieznośnego” ($UGR = 28$), co przedstawiono na rys. 9.



Rys. 9. Skala oceny oślnienia przykrego zastosowana w badaniach w CIOP-PIB [181]

Fig. 9. Glare rating scale, which was used in study [181]

Badani przed przystąpieniem do badań właściwych odbyli „trening”, którego zadaniem było:

- przedstawienie badanym celu planowanych eksperymentów i wyjaśnienie, co to jest oślnienie przykre,
- przedstawienie badanym znormalizowanej skali odczuć subiektywnych przypisywanych do wielkości odczucia oślnienia przykrego i następnie zademonstrowanie poszczególnych poziomów oślnienia,
- przeprowadzenie praktycznego treningu oceny subiektywnej oślnienia,

Wytłumaczono, że występują pośrednie odczucia oślnienia, pomiędzy zdefiniowanymi i zaznaczonymi na skali. Następnie przyjmując określone obliczeniowo z wykorzystaniem programu DIALUX wartości *UGR* przy różnych odległościach obserwacji od oprawy oświetleniowej, które zaznaczono na podłodze pomieszczenia, przeprowadzono trening oceny oślnienia. Po usadowieniu badanego na krześle z regulowaną wysokością siedziska tak, aby wysokość oczu nad podłogą wynosiła 1,2 m (wysokość przyjęta w obliczaniu *UGR*) ustawiano na początku badanego siedzącego na krześle w odległości jego oczu odpowiadającej oślnieniu jeszcze do przyjęcia. Proszono o patrzeć na wprost i „wczucie się” w występujące otoczenie świetlne i jaskrawości jednocześnie, definiując badanemu, jakie odczucie oślnienia przykrego teoretycznie odpowiada tej sytuacji. Następnie przysuwano badanego do źródła oślnienia i kolejno ustawiano przy różnych odległościach odpowiadających różnym odczuciom oślnienia. Następnie powtarzano to samo, tylko oddalając się od źródła, czyli przy malejącym odczuciu oślnienia. W trakcie treningu badany miał w rękach ankietę ze skalą oślnienia i za każdym razem, po zmianie poziomu oślnienia i określeniu jego znormalizowanej nazwy, wskazywano badanemu na skali jego położenie. Następnie sytuowano badanego daleko od źródła oślnienia i proszono, aby samodzielnie powoli przesuwał się w kierunku źródła oślnienia i zatrzymywał się w miejscach, w których uważa, że zmieniło się jego odczucie oślnienia, zgodnie z omówioną wcześniej skalą. Za każdym razem zapisywano odległość, w której badany wskazywał na kolejno występujące odczucia oślnienia. Następnie ten sam proces powtarzano podczas oddalania się badanego od źródła oślnienia. Przysuwanie się i oddalanie od źródła oślnienia z określaniem odczuć badanego powtarzano co najmniej 3-krotnie, aż do momentu, gdy zaobserwowane odległości od źródła oślnienia, przy których badany się zatrzymywał, określając dane odczucie były bardzo podobne, tj. różniły się co najwyżej o 10–20 cm. Szczególną uwagę przykładano do odległości, przy których oceniane było odczucie: „pomiędzy jeszcze do przyjęcia a niewygodą”.

Dopiero po takim przygotowaniu, badani mogli brać udział w badaniach oceny oślnienia przykrego. W wyniku badań przeprowadzonych przy dwóch różnych poziomach oślnienia przykrego stwierdzono, że wyznaczone wartości *UGR* na podstawie pomiaru opracowana metodą z wykorzystaniem fotometru matrycowego są bliższe odczuciom osób badanych niż wartości wyznaczone w programie symulacyjnym DIALux [182, 135].

5.3.7. PRAKTYCZNE ZASTOSOWANIE SKALI DE BOERA
DO OCENY OLŚNIENIA PRZEZ PRACOWNIKÓW
ZATRUDNIONYCH NA ZEWNĘTRZNYCH STANOWISKACH PRACY

W przypadku oceny olśnienia na zewnętrznych stanowiskach pracy przez pracowników wymagał przereformowania sformułowań oceny subiektywnej olśnienia. Tym razem dotyczyło to skali de Boera, gdyż jest ona przypisana odpowiednio do wartości wskaźnika olśnienia *GR*. Dokonano weryfikacji ankiety w badaniach pilotażowych, w wyniku której uzyskano następującą skalę oceny olśnienia, która służyła do badań olśnienia na zewnętrznych stanowiskach pracy [183]. Zrezygnowano z pośrednich nazw odpowiadających ocenie olśnienia skali de Boera, zostawiając tylko opisy krańcowych odczuć. Na rysunku 10 przedstawiono wycinek ankiety oceny oświetlenia, który dotyczy oceny olśnienia. Ankieta ta była wypełniana przez autorów podczas wywiadu z pracownikami, co ułatwiało wytłumaczenie skali olśnienia pracownikom.

Czy podczas wykonywania pracy po zmroku widzi Pan/Pani bardzo jaskrawe źródła światła?				
<input type="checkbox"/> Tak <input type="checkbox"/> Nie				
Jeśli Tak, to:				
a) proszę określić rodzaj czynności kiedy to występuje w największym stopniu. Proszę wpisać nazwę czynności zgodnie z listą w punkcie 7				
.....				
.....				
b) proszę określić jak bardzo to jaskrawe źródło światła przeszkadza Panu/ Pani podczas pracy , w skali od 1 do 5, gdzie 1 oznacza – jest nie do zniesienia (całkowite oślepienie przez krótki czas), a 5 – oznacza – jest niezauważalne:				
1	2	3	4	5
jest nie do zniesienia (całkowite oślepienie przez krótki czas)			jest niezauważalne	
<input type="checkbox"/>				

Rys. 10. Wycinek ankiety oceny oświetlenia dotyczący oceny olśnienia
Fig. 10. Part of lighting evaluation questionnaire concerning glare assessment

Zastosowanie tak opracowanej ankiety umożliwiło ocenę olśnienia na zewnętrznych stanowiskach pracy w siedmiu badanych przedsiębiorstwach i określenie stanowisk o szczególnie wysokim narażeniu na olśnienie.

6. POMIAR WSKAŹNIKA OLŚNIENIA

6.1. WYZNACZENIE WSKAŹNIKA OLŚNIENIA NA PODSTAWIE POMIARU LUMINANCJI

Analizując wzory definiujące odpowiednie wskaźniki olśnienia oraz zależności wiążące te zależności z parametrami oświetleniowymi (rozdz. 5), można zauważyć, że podstawowymi parametrami we wszystkich przypadkach są wartości luminancji postrzegane w odpowiednich kątach w polu widzenia obserwatora. A zatem podstawą wyznaczenia wskaźnika olśnienia jest pomiar rozkładu luminancji z punktu widzenia obserwatora – pracownika na stanowisku pracy, dla którego chcemy określić warunki oświetleniowe. Pomiar ten musi także uwzględniać zależności geometryczne właściwe dla odpowiedniego wskaźnika, a określone normami i dokumentami CIE.

Skutecznym sposobem wyznaczenia rozkładu luminancji jest zastosowanie miernika matrycowego, tzw. ILMD (ang. *Image Luminance Measuring Device*) [13, 14]. W artykule Błaszczaka [14] została przeprowadzona szczegółowa analiza obrazu rozkładu luminancji uzyskanego z zastosowaniem ILMD do potrzeb wyznaczenia wskaźnika olśnienia *UGR*. W praktyce obecnie są dwie grupy rozwiązań fotometrów ILMD przeznaczonych do wyznaczenia rozkładu luminancji. Pierwsza grupa to są stosunkowo drogie stacjonarne przyrządy pomiarowe przeznaczone do badań laboratoryjnych [96]. Druga grupa zawiera „urządzenia konsumenckie”, które można stosować w różnych warunkach poza laboratorium. Urządzenia te są oparte na kamerach cyfrowych [97]. Właściwa kalibracja i specjalistyczne oprogramowanie zapewnia właściwy pomiar luminancji. Takie oprogramowanie jest zwykle w zestawie z urządzeniem do pomiaru rozkładu luminancji. Można także próbować wykorzystać oprogramowanie niezależne [8], system EVALGLARE [52] współpracujący z oprogramowaniem symulacyjnym RADIANCE [125]. Druga grupa urządzeń jest najczęściej wykorzystywana do pomiarów rozkładów luminancji i oceny olśnienia przez wyznaczenie odpowiednich wskaźników *UGR*, *DGP* (*DGI*) *TI*.

Na podstawie własnych doświadczeń autorów [179] można zaproponować procedurę umożliwiającą ocenę olśnienia na podstawie pomiaru rozkładu luminancji i wyznaczenia właściwego wskaźnika olśnienia, którą w odniesieniu do *UGR* i *GR* przedstawiono w tabeli 9. W obu przypadkach stosowany jest przenośny fotometr matrycowy do pomiaru rozkładu luminancji. Podczas wyznaczenia *UGR* jest wyposażony w obiektyw typu *fish eye*, a w przypadku wyznaczenia *GR* w obiektyw typu *fish eye* lub standardowy o ogniskowej 17 mm (w zależności od wielkości kątowej źródeł olśnienia). Fotometr mocowany jest na statywie, który powinien być stabilnie ustawiony w punkcie pomiaru i wypoziomowany.

Tabela 9. Procedura pomiaru podczas wyznaczania wskaźnika *UGR* i *GR*
 Table 9. Measurement procedure when determining the indicator *UGR* and *GR*

Punkt procedury pomiaru	Przy wyznaczaniu <i>UGR</i>	Przy wyznaczaniu <i>GR</i>
Miejsce pomiaru	Stanowisko pracy we wnętrzu	Stanowisko pracy na zewnątrz
Punkt/y pomiaru	W punkcie odpowiadającym stanowisku pracownika	W punktach obszaru zadania, wyznaczonych zgodnie PN-EN 12464-2
Wysokość punktu pomiaru (środek matrycy fotometru)	1,2 m nad podłogą – pozycja siedząca, 1,5 m nad podłogą – pozycja stojąca	1,5 m nad podłożem
Ustawienie linii widzenia fotometru – płaszczyzna pionowa	Pozioma (0°)	2° poniżej linii poziomej
Ustawienie linii widzenia fotometru – płaszczyzna pozioma	Kierunek – podczas obserwacji na wprost w normalnej pozycji pracy	Ustawienie linii kolejno w 8 kierunkach obserwacji co 45° wokół pionowej osi obrotu
Ustawienie środkowego czasu naświetlania do serii zdjęć HDRI	Na podstawie maksymalnej wartości luminancji zmierzonej analogowym miernikiem luminancji, zgodnie z algorytmem ustawiania czasu [133]	
Wykonanie zdjęć HDRI	Wykonanie serii co najmniej 3 zdjęć HDRI: przy ustawieniu środkowego czasu naświetlania przyjętego zgodnie z algorytmem ustawiania czasu [133] oraz przy czasach naświetlania o dwa stopnie wyższy oraz o dwa stopnie niższy	
Import zdjęć HDRI do oprogramowania wyznaczającego mapy luminancji	Oprogramowanie, np. LMK LabSoft	
Eksport mapy luminancji do pliku w postaci akceptowanej przez program obliczeniowy do wyznaczania indeksu	Arkusz Excel kompatybilny z oprogramowaniem LMK LabSoft – wyznaczanie <i>UGR</i>	Autorski program w środowisku Matlab – wyznaczanie maksymalnego <i>GR</i> (spośród 8 zmierzonych kierunków w danym punkcie pomiarowym)

6.2. ANALIZA BŁĘDÓW

Analizy zgodności pomiarowo wyznaczonego wskaźnika oślnienia przykrego z wrażeniami człowieka, uzupełnione opisami podstawowych problemów pomiarowych są bardzo szeroko przedstawiane w literaturze [2, 37, 46, 57, 135, 143, 144, 173–175]. Ocena oślnienia na podstawie wyznaczania wartości wskaźnika oślnienia jest procesem bardzo złożonym. Stąd wiele różnych aspektów wpływających na ten proces:

- 1) Właściwe wybranie punktu pomiarowego. Jest to decydujący problem związany z oceną oślnienia na stanowisku pracy. Doświadczenia autorów w tym zakresie pokazują, że jest to najważniejsze zadanie przed wykonaniem właściwych pomiarów. Wymagane są: rozmowy z pracownikami i kierownictwem zakładu pracy, wizja lokalna oraz precyzyjne zaplanowanie działań obejmujących także dobór właściwego sprzętu i czasu pracy.

- 2) Prawidłowe ustawienie aparatu w miejscu pomiaru (pracy lub przebywania obserwatora), tak aby środek detektora matrycowego znajdował się na wysokości oczu obserwatora (np. dla pozycji siedzącej – 1,2 m), a oś optyczna pokrywała się z przyjętą linią obserwacji – właściwą dla odpowiedniego wskaźnika olśnienia; wówczas obraz rejestrowany przez aparat powinien pokrywać się z polem widzenia obserwatora [177].
- 3) Dobór odpowiedniego obiektywu, aby jego kąt widzenia pokrył (był co najwyżej minimalnie większy) kąt widzenia obserwatora na stanowisku pracy. Najczęściej do pomiarów *UGR* stosuje się obiektywy typu *Fish Eye* o kącie widzenia zbliżonym do 180°. Do pomiarów *GR* autorzy stosują albo obiektyw *Fish Eye* albo standardowy obiektyw o zmiennej ogniskowej dobrany do właściwego stanowiska i pola widzenia pracownika w miejscu pracy. Alternatywą jest zrobienie serii zdjęć, które w sumie pokryją odpowiednie pole widzenia, ale w tym przypadku wiąże się to z zaplanowaniem odpowiedniej procedury pomiarowej, doбором właściwego sprzętu (odpowiednia panoramiczna głowica fotograficzna) oraz zastosowaniem odpowiedniego oprogramowania.
- 4) Określenie maksymalnej luminancji źródła olśnienia z punktu położeniu oka obserwatora z wykorzystaniem standardowego miernika luminancji. To zadanie może być niebanalne dla współczesnych źródeł LED o bardzo dużej wartości luminancji.
- 5) Prawidłowe naświetlenie serii zdjęć wykonanych w trybie HDRI, tak aby zakres luminancji (źródła i tła), mierzonych przez system, odpowiadał ich wartościom rzeczywistym (wcześniej zmierzonym). Aby pokryć zakres tonalny, występujący w rzeczywistych warunkach, wymagane jest właściwe dobranie czasów naświetlania – pomocny jest algorytm zaproponowany przez autorów niniejszego opracowania [133]. Zastosowanie trybu HDRI nie rozwiązuje problemu pokrycia tonalnego, problem ten został szerzej omówiony w rozdziale 6.6.
- 6) Błędy „fotograficzne” wynikające z zastosowania aparatu fotograficznego do pomiarów rozkładu luminancji [20]. Najczęściej wymienia się problemy: wietowania, niezamierzonego rozpraszania lub skupiania światła przez obiektywy, problemy zniekształceń chromatycznych i geometrycznych obiektywów. Jest to grupa błędów, na które nie mamy wpływu, ale znane są próby korekcji ich wpływu na proces pomiarowy [20].
- 7) Ewentualne błędy, które mogą być wynikiem nie do końca przemyślanego wykorzystania oprogramowania do wyznaczania wskaźnika olśnienia. Warto zwrócić uwagę na sprawdzenie poprawności zmierzonego rozkładu luminancji po przetworzeniu serii zdjęć do postaci HDRI oraz na prawidłowy dobór luminancji progowej wydzielającej (w postaci „maski” zakresu luminancji) luminancję tła.
- 8) Błędy związane z pośrednią metodą wyznaczania wartości wskaźnika olśnienia. Błędy te zostaną omówione dalej.

Wartości wskaźników UGR i GR są wyznaczane pośrednio na podstawie rozkładu luminancji. Formuły, dla UGR (19) i GR (20) można zapisać w postaci zależnej od pojedynczego źródła oślnienia i uwzględniającej (dla GR) parametry mierzone, odpowiednio (26) i (27).

$$UGR = 8 \log_{10} \left(\frac{0,25 \cdot L_i^2 \omega_i}{L_u \cdot P_i^2} \right) \quad (26)$$

$$GR = 27 + 24 \log_{10} \left(\frac{10 \cdot L_{ai} \cdot \omega_i \cdot \cos \theta_i \cdot \theta_i^{-2}}{(0,035 \cdot L_b)^{0,9}} \right) \quad (27)$$

Została przeprowadzona analiza błędów metodą różniczki zupełnej – zależności (28) i (29) dla UGR oraz (30) i (31) dla GR .

$$\Delta_{UGR} \leq \left| \frac{16}{\ln(10) \cdot L_i} \right| \cdot \Delta_{L_i} + \left| \frac{8}{\ln(10) \cdot \omega_i} \right| \cdot \Delta_{\omega_i} + \left| \frac{-16}{\ln(10) \cdot P} \right| \cdot \Delta_P + \left| \frac{-8}{\ln(10) \cdot L_u} \right| \cdot \Delta_{L_u} \quad (28)$$

czyli

$$\Delta_{UGR} \leq \frac{8}{\ln(10)} \left(\frac{2}{L_i} \cdot \Delta_{L_i} + \frac{1}{\omega_i} \cdot \Delta_{\omega_i} + \frac{2}{P} \cdot \Delta_P + \frac{1}{L_u} \cdot \Delta_{L_u} \right) \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \Delta_{GR} \leq & \left| \frac{24}{\ln(10) \cdot L_{ai}} \right| \cdot \Delta_{L_{ai}} + \left| \frac{24}{\ln(10) \cdot \omega_i} \right| \cdot \Delta_{\omega_i} \\ & + \left| \frac{-24 \cdot (\theta_i \cdot \tan(\theta_i) + 2)}{\ln(10) \cdot \theta_i} \right| \cdot \Delta_{\theta_i} + \left| \frac{-24 \cdot 0,9}{\ln(10) \cdot L_b} \right| \cdot \Delta_{L_b} \end{aligned} \quad (30)$$

czyli

$$\Delta_{GR} \leq \frac{24}{\ln(10)} \left(\frac{1}{L_{ai}} \cdot \Delta_{L_{ai}} + \frac{1}{\omega_i} \cdot \Delta_{\omega_i} + \left(\tan \theta_i + \frac{2}{\theta_i} \right) \cdot \Delta_{\theta_i} + \frac{0,9}{L_b} \cdot \Delta_{L_b} \right) \quad (31)$$

gdzie: Δ_{GR} – niepewność pomiaru (pośredniego wyznaczania wskaźnika GR), $\Delta_{L_{ai}}$ – niepewność pomiaru średniej luminancji i -tej oprawy (cd/m^2), Δ_{ω_i} – niepewność pomiaru kąta bryłowego i -tej oprawy ω_i (sr), Δ_{θ_i} – niepewność pomiaru kąta θ_i , Δ_{L_b} – niepewność pomiaru średniej luminancji otoczenia (cd/m^2).

Zwykle luminancja otoczenia nie przekracza wartości 100 cd/m^2 . Natomiast przyjmuje się, że oślnienie przykre może występować dopiero przy luminancji źródła przekraczającej 600 cd/m^2 [26]. W praktyce najczęściej wartość luminancji oprawy jest przynajmniej 1000 razy większa, niż luminancja otoczenia (w przypadku źródeł

LED mnożnik może być znacznie większy). W obu przypadkach luminancja mierzona jest przez ten sam przyrząd, co oznacza, że wartości Δ_{Lai} i Δ_{Lb} są takie same. Na podstawie wzoru (31) można obliczyć wpływ mierzonej luminancji na niepewność wyznaczanego wskaźnika GR . Biorąc pod uwagę związek między luminancją źródła a otoczenia, można stwierdzić, że decydującym czynnikiem jest niepewność pomiaru luminancji otoczenia. Wpływ niepewności pomiaru luminancji źródła jest znacząco mniejszy – praktycznie pomijalny. Z drugiej strony wiadomo, że niższa lub niewystarczająca rozdzielczość matrycy fotometru (ILMD) prowadzi do znaczących zafałszowań wyników [136, 144]. Ma to zastosowanie do uśredniania luminancji z większych powierzchni pomiarowych. A zatem stosunkowo większe lokalne zmiany luminancji otoczenia, jeśli nie są interpretowane prawidłowo przez odpowiednią rozdzielczość, będą po prostu uśredniane przez pojedynczy element pomiarowy matrycy. W tym przypadku trudno mówić o znaczącym wpływie rozdzielczości na wyznaczaną luminancję dekontrastującą otoczenia.

6.3. CZYNNIKI WPLYWAJĄCE NA OCENĘ/POMIAR WSKAŹNIKA OLSNIENIA

Istnieje wiele czynników, których wpływ należy uwzględnić w ocenie olśnienia. Jeśli nie podczas pomiarów lub wyznaczania wartości wskaźników, to potem przy ich interpretacji.

Jednym z najważniejszych czynników zależnych od percepcji człowieka jest wskaźnik położenia. Badania prowadzone w latach 40. ubiegłego stulecia [99] pokazały, że wrażenie olśnienia bardzo silnie zależy od położenia źródła olśnienia w polu widzenia obserwatora. Ważna jest przede wszystkim odległość kątowa od linii wzroku, ale stwierdzono także, że dla takich samych kątów wrażenie olśnienia może być różne dla różnych położzeń w polu widzenia. Najprawdopodobniej wpływ na to mają nierównomierność rozkładu receptorów na siatkówce oka (rozdz. 2.2; rys. 5) oraz utrwalone zasady interpretacji bodźców przez nasz mózg. Guth zaproponował parametr P (tzw. wskaźnik Gutha) [99], który przyjmuje wartości z zakresu od 1 (położenie na linii wzroku) do 15 (położenie na obrzeżach pola widzenia). Została sformułowana zależność matematyczna opisująca wartość indeksu jako funkcja położenia, wartości indeksu zostały stabilizowane [29].

Indeks Gutha występuje praktycznie we wszystkich wzorach służących do wyznaczenia wskaźników olśnienia. W tym także w formule dla UGR (19). Formuła dla GR (20) nie zawiera bezpośrednio tego indeksu. Jednak jeśli przeanalizujemy formułę w wersji zawierającej mierzone parametry (27), to można zauważyć, że zależności kątowe uwzględnione we wzorze są tak dobrane, że dają bardzo zbliżony wpływ na wartość wskaźnika jak indeks Gutha [180].

Wpływ położenia źródła olśnienia był wielokrotnie badany od czasu wprowadzenia indeksu Gutha [80, 89, 91, 151]. W pracy [80] po raz pierwszy zwrócono uwagę na duży problem właściwej oceny położenia źródeł światła umieszczonych poniżej

linii horyzontu. Szeroko zakrojone badania prezentowane w pracach [89, 91] pokazały drobne rozbieżności wpływu położenia źródła olśnienia w stosunku do klasycznego już wskaźnika Gutha. Szczególnie było to widoczne w płaszczyźnie pionowej ponad linią wzroku. Bardzo ważnym natomiast efektem tych badań jest propozycja nowego wskaźnika położenia dla całego pola widzenia, ze szczególnym uwzględnieniem pola poniżej linii wzroku. Jest to szczególnie istotne dla oceny olśnienia na stanowiskach pracy na zewnątrz, gdzie źródła światła spotyka się praktycznie w całym polu widzenia pracownika – często także poniżej linii wzroku.

Wpływ wskaźnika położenia na olśnienie przykre przedstawiono w pracach [83, 102, 184, 171].

Drugim czynnikiem związanym z percepcją człowieka i silnie wpływającym na wrażenie olśnienia jest wiek odbiorcy.

W 1999 roku stwierdzono, że olśnienie ma silniejszy wpływ na percepcję wzrokową u osób starszych [68]. Zróżnicowanie odczucia olśnienia w zależności od rodzaju grupy obserwatorów (osoby starsze w wieku 50+ a osoby młode) było celem badań opublikowanych w [178].

Warto także zwrócić uwagę na czynniki kulturowe i rasowe. W latach 90. XX wieku przeprowadzono badania [123] na grupie Japończyków, Europejczyków i Amerykanów. Badania wykazały, że Japończycy są o wiele bardziej tolerancyjni na olśnienie przykre niż pozostałe grupy, co może wynikać z różnic kulturowych oraz anatomicznych (powieki, ułożenie oka w oczodole).

Interesujące są zależności czasowe związane z olśnieniem. Prowadzone są badania nad szybkością odzyskania ostrości widzenia po zjawisku olśnienia. Autorzy pracy [79] stwierdzili, że zwiększenie natężenia oświetlenia źródła olśnienia powoduje wzrost czasu odzyskania ostrości. Również eksperymentalnie wykazano, że wydłużenie czasu ekspozycji na olśnienie także powoduje wzrost czasu odzyskiwania ostrości [93]. Można także mówić o pewnej dawce olśnienia (poziom luminancji zamglenia \times czas trwania) im wyższa jest ta dawka, tym dłuższy jest czas odzyskiwania ostrości [23]. Jednocześnie czas odzyskiwania ostrości maleje przy wzroście poziomu luminancji tła [79].

Jednym z poważniejszych problemów jest wpływ barwy i rozkładu spektralnego źródeł olśnienia na dyskomfort. Bullough [18] przeprowadził eksperymenty z wykorzystaniem źródeł światła o różnych rozkładach spektralnych, od monochromatycznego do pojedynczych barw o różnych spektrach. Stwierdził, że fale o mniejszej długości mają silniejszy wpływ na odczucie olśnienia. W pracy [7] przeanalizowano także wpływ rozkładu spektralnego na oddziaływanie pozawzrokowe.

6.4. OLŚNIENIE POCHODZĄCE OD MAŁYCH ŹRÓDEŁ I LED

Zasady wyznaczania wskaźnika *UGR* określają precyzyjnie ograniczenia kątowe obserwowanego źródła. Przyjęto, że źródło powinno zawierać się w przedziale od

0,0003 sr do 0,1 sr. Pomijalne są więc zarówno bardzo małe źródła światła, jak i bardzo duże. Dokumenty CIE z 2002 roku [31, 32] rozszerzyły możliwość stosowania wskaźnika *UGR*. Wynikało to w dużej mierze z szerokiego stosowania opraw rastrowych. W publikacji CIE przyjęto, że w takim przypadku we wzorze na *UGR* luminancja źródła powinna być wyrażona przez iloraz światłości oprawy w danym kierunku (*I*) i pola pozornej powierzchni świecącej (*A_p*):

$$L = \frac{I}{A_p} \quad (32)$$

Jednocześnie przyjęto, że pozorna powierzchnia świecąca źródła nie powinna być mniejsza od 0,005 m², a źródło powinno występować co najmniej 5° powyżej linii obserwacji. Wówczas otrzymujemy po przekształceniach następujący wzór (33):

$$L = \frac{I}{0,005} = 200 \cdot I \quad (33)$$

Uwzględniając, że kąt bryłowy widzenia źródła olśnienia ω również zależy od pozornej powierzchni świecącej *A_p* i odległości źródła od oczu *r*, otrzymujemy:

$$\omega = \frac{A_p}{r^2} = \frac{0,005}{r^2} \quad (34)$$

Wówczas wzór na *UGR* dla pojedynczego małego źródła światła jest następujący:

$$UGR = 8 \log \left(\frac{0,25}{L_b} \cdot \frac{200 \cdot I^2}{r^2 \cdot p^2} \right) \quad (35)$$

Podobnie można postąpić w przypadku wyznaczanego wskaźnika *GR* dla bardzo małych źródeł światła, których luminancja nie jest możliwa do wyznaczania na podstawie pomiaru miernikiem luminancji. W przypadku matrycowego miernika luminancji wynikać to będzie z ograniczeń rozdzielczości kątowej matrycy i zastosowanej ogniskowej obiektywu.

Dla wskaźnika *GR* nie wprowadzono żadnych zmian związanych z małymi źródłami światła. Niestety olśnienie na zewnętrznych stanowiskach pracy może być dzisiaj powodowane także przez odległe źródła o dużej luminancji. Ich pozorna powierzchnia świecąca będzie na tyle mała, że pomiar luminancji miernikiem matrycowym będzie bardzo utrudniony lub wręcz niemożliwy [144, 159].

Wprowadzenie do oświetlenia ogólnego wydajnych energetycznie źródeł LED-owych dodało znaczenia dyskusji nad olśnieniem od źródeł światła małych i tych o nierównomierniej luminancji [58, 111]. Także w zakresie zastosowania współczesnych metod badań (fMRI) nad percepcją [127].

Badanie wpływu na oślnienie małych źródeł i źródeł o nierównomiernym rozkładzie luminancji (głównie LED-ów) było celem wielu eksperymentów [3, 21, 56, 58, 77, 98, 104, 138, 139, 154, 186].

Wprawdzie badania w latach 90. ubiegłego stulecia [53] pokazały, że dla małych źródeł światła o rozmiarze kątowym $0,3^\circ$ lub $0,6^\circ$ widocznych w polu widzenia rozmiar nie wpływa w ogóle na poprawne rozróżnianie szczegółów. Jednak należy wziąć pod uwagę fakt, że badania te były przeprowadzone z użyciem konwencjonalnych źródeł światła. Natomiast źródła LED-owe w takich samych warunkach geometrycznych mogą wpływać przez swoją bardzo dużą luminancję. Potwierdziły to późniejsze badania: wzrost luminancji małych źródeł powoduje wzrost dyskomfortu [132]. Problemy związane z rozmiarami i geometrią źródeł są decydujące dla oceny wpływu źródeł LED na oślnienie. Potwierdzają to prace [84, 139, 155], w których autorzy badali wpływ matryc LED-ów na wrażenie oślnienia, oraz praca [161], gdzie badany był wpływ kąta obserwacji i położenia źródła na oślnienie.

W pracy [107] autorzy analizowali różnice w wywoływaniu oślnienia za pomocą różnych źródeł światła: tradycyjnych i LED-owych w różnych wykonaniach. Ponieważ źródła LED-owe charakteryzują się małą pozorną powierzchnią świecąca, więc autorzy pracy stosowali formułę wyznaczania *UGR* dla małych źródeł i formułę standardową. Wnioskiem z badań było stwierdzenie, że wzór tradycyjny daje ocenę bliższą percepcji człowieka.

W badaniach uwzględniających równoważną średnią luminancję źródła oceniane oślnienie przykre jest większe od źródeł o nierównomiernej luminancji niż od źródeł o równomiernej luminancji [94, 152, 153, 154, 185, 187]. W publikacjach [46, 47] dotyczących subiektywnej oceny oślnienia przykrego od źródeł o różnym nierównomiernym rozkładzie luminancji modelowanym przez czarno-białe pasy o różnej częstotliwości przestrzennej źródła wykazano, że wraz ze wzrostem częstotliwości przestrzennej wzrasta dyskomfort, lecz z drugiej strony nierównomierny bodziec jest uważany jako mniej dyskomfortowy niż jednorodny. Stwierdzono również wpływ struktury świetlnej opraw o nierównomiernej luminancji na odczucie dyskomfortu, a zwłaszcza luminancji stosunkowo ciemnych części oprawy oraz średniej luminancji źródła oślnienia [55]. Natomiast nie stwierdzono wpływu odległości między punktami świetlnymi LED-ów wewnątrz oprawy, bez względu na kierunek obserwacji kontrastu luminancji wewnątrz oprawy [55]. Natomiast inne badania wykazały, że przy nierównomiernych rozkładach luminancji źródła oślnienia najlepszym predykatorem komfortu jest maksymalna luminancja w centralnym obszarze źródła oślnienia i wraz z jej wzrostem maleje komfort, natomiast średnia luminancja oprawy i wskaźnik równomierności liczony jako iloraz luminancji otoczenia do luminancji w centralnym obszarze są słabymi predyktorami komfortu [138]. Badania w modelowym pomieszczeniu pracy typu „open-plane” z różnymi oprawami LED-owymi o różnym rozkładzie przestrzennym LED-ów wykazały, że oprawy o nierównomiernych obszarach luminancji i wysokim kontraście luminancji wywołują większe oślnienie niż oprawy o równomiernym

rozkładzie luminancji. Tylko dla opraw o kontraście luminancji (brzeg -środek) do 1:10 UGR koreluje z subiektywną oceną olśnienia [58].

Do najbardziej radykalnych wniosków doszli autorzy pracy [21]. Stwierdzili oni bowiem, że wszystkie dotychczas stosowane formuły są niewłaściwe do oceny olśnienia od źródeł LED. Inne badania udowadniają, że ocena olśnienia złożonych scen świetlnych (z małymi lub dużymi źródłami, złożone rozkłady luminancji) może wymagać fundamentalnych zmian w tworzeniu modeli olśnienia [35, 36, 37]. Stąd pojawiają się również nowe propozycje wzorów na *UGR* dla opraw z białymi LED-ami o różnym rozmieszczeniu przestrzennym w oprawie [139, 154, 186]. We wzorze na *UGR* proponowanym przez Tashiro [154] zamiast sumy luminancji źródła olśnienia występuje luminancja całkowita liczona jako suma luminancji w obszarze bodźca testowego wyznaczana na podstawie obrazu mapy luminancji oraz ograniczony został wpływ luminancji tła poprzez zastosowanie dla niej wykładnika potęgi 0,45. We wzorze zastosowano również inne stałe liczbowe dla uzyskania korelacji z subiektywną oceną olśnienia. Natomiast Yang [186] zmodyfikował wzór na *UGR* dla małych źródeł światła [31, 32] przez zwiększenie wagi wskaźnika położenia. Uzyskano to poprzez dodanie wykładnika potęgowego dla wskaźnika położenia. Wykładnik ten obliczany jest jako suma „wagi” w równomiernych matrycach LED-owych w oprawie oraz „kontrastu” w matrycach o nierównomiernym rozkładzie luminancji. Dzięki temu uzyskano większy wpływ na wynik *UGR* małych matryc o równomiernym rozkładzie luminancji, a jeszcze bardziej matryc o nierównomiernych obszarach luminancji. Przewidywanie olśnienia przykrego na podstawie obrazu mapy luminancji źródeł o nierównomiernej luminancji opisane jest m.in. przez Nakamurę [104], który podaje model matematyczny do przewidywania olśnienia na podstawie wyznaczanego profilu luminancji.

6.5. PROBLEMY TECHNICZNE POMIARU INDEKSU *GR*

Wykonanie poprawnych pomiarów wskaźnika *GR* wymaga wyznaczenia jego wartości w ośmiu kierunkach, zakładając obrót wokół osi pionowej [28]. Jednocześnie zapewnienie odpowiedniej rozdzielczości może wymagać wyznaczenia *GR* na podstawie kilku map luminancji – na podstawie zestawu zdjęć wykonanych w różnych kierunkach z tego samego punktu widzenia. W takiej sytuacji wymagany jest stały punkt widzenia i możliwość obrotu fotometru w taki sposób, aby nie powstawał błąd paralaksy. Błąd ten może wpływać w znaczący sposób na wynik pomiaru *GR*. Oczywiście jeśli przeanalizujemy zależności określające wpływy poszczególnych parametrów i błędów ich pomiarów na wynik końcowy, to można byłoby stwierdzić, że niewielkie przesunięcie fotometru (kilka cm) ma niewielki wpływ na wynik końcowy. Jednak tak będzie tylko wtedy, gdy zawsze wszystkie źródła światła są poprawnie widoczne. Jeśli natomiast przesunięcie fotometru spowoduje zasłonięcie źródła (np. elementem konstrukcji w danym miejscu pracy), to może to mieć silny wpływ na wynik końcowy.

Skutecznym sposobem wyeliminowania błędu paralaksy jest zastosowanie głowicy panoramicznej, która umożliwia obracanie fotometru wokół Punktu bez Paralaksy (NPP – *No Parallax Point*), nazywanego także punktem źrenicy wejściowej (*entrance pupil*). Powszechnie, aczkolwiek błędnie, punkt ten nazywany jest punktem nodalnym (*Nodal Point*). W naszych badaniach została wykorzystana głowica panoramiczna zbudowana w systemie Arca-Swiss. Doposażono statyw w głowicę panoramiczną z dwoma rotatorami umożliwiającymi obrót fotometru niezależnie w płaszczyźnie poziomej oraz pionowej bez zmiany położenia środka obrotu. Zastosowanie dwóch rotatorów umożliwia w dwóch osiach obrotu uzyskanie stałych, zadanych i powtarzalnych kątów obrotu (np. co 10° lub co 45°) – rys. 11.



Rys. 11. Fotometr zamocowany na głowicy panoramicznej
Fig. 11. ILMD mounted on the panoramic head

Zastosowanie głowicy panoramicznej z dwoma rotatorami z jednej strony zapewnia poprawne obroty fotometru wokół punktu NPP, a z drugiej może w znacznym stopniu ułatwić wykonywanie prawidłowych ustawień fotometru podczas pomiarów na stanowiskach pracy na zewnątrz, a tym samym skrócić czas wykonywania pomiarów.

6.6. PROBLEMY ZAKRESU TONALNEGO

Człowiek jest w stanie widzieć obraz w bardzo szerokim zakresie luminancji: od $0,000001$ do $1\ 000\ 000\ \text{cd/m}^2$ [92, 158] – zakres pracy czopków i pręcików (rys. 2). Współcześnie produkowane matryce fotograficzne, nawet do celów specjalnych, nie pokrywają tak ogromnego zakresu luminancji.

Zakres tonalny obiektu rejestrowanego na obrazie można ocenić, stosując parametr EV (ang. *Exposure Value*). Jest on definiowany formułą (36) i opisuje warunki świetlne na potrzeby fotografii [81]. Zwiększenie EV o jeden stopień odpowiada powiększeniu otworu przysłony o jeden stopień lub dwukrotnemu wydłużeniu czasu ekspozycji (standardowo w aparatach fotograficznych jest to też zmiana o jeden stopień). Więcej informacji na temat podstawowych parametrów wpływających na zakres tonalny oraz o wykorzystaniu ich w radiometrii można znaleźć w artykule [66].

$$EV = \log_2 \frac{f_{AV}^2}{TV} \quad (36)$$

gdzie: f_{AV} – względny otwór przysłony obiektywu, TV – czas ekspozycji (otwarcia migawki aparatu) w sekundach.

Wartość parametru EV jest związana bezpośrednio z konkretnym przetwornikiem (matrycą CCD lub CMOS) aparatu fotograficznego i jest podawana dla konkretnej czułości. Najczęściej jest to 100 ISO, jednak czasami wymagana jest inna czułość, wtedy przelicza się wartość EV [133]. Formalnie parametr EV nie jest miarą ani natężenia oświetlenia, ani luminancji, jednak przy prawidłowo naświetlonym obrazie wartość EV jest proporcjonalna do natężenia oświetlenia w danym punkcie [126].

Używając parametru EV , można określić zakres tonalny, jaki jest potrzebny do uzyskania obrazu poprawnie naświetlonego. Dla typowego pomieszczenia biurowego, jeśli widok nie obejmuje źródeł światła (także pośrednich), to zakres ten wynosi ok. 6–8 EV . Pojawienie się źródeł światła powoduje wzrost wartości do 20 EV lub więcej. Przyjmuje się, że system wzrokowy człowieka dzięki pracy czopków i pręcików (rys. 2) umożliwia poprawne rozróżnianie szczegółów w zakresie tonalnym ok. 14 EV . Zakres tonalny typowego sensora fotograficznego (CCD lub CMOS) to tylko ok. 6–8 EV (przy rozdzielczości 3×8 bitów na piksel) [45]. Zjawisko olśnienia występuje wtedy, gdy w polu widzenia pojawia się źródło światła o dużej luminancji – zakres tonalny w tym przypadku może przekraczać standardowe możliwości percepcyjne człowieka – stąd pośrednio wynika problem dyskomfortu. Natomiast ocena pomiarowa takiego zjawiska wymagałaby sensora, który poprawnie zarejestrowałby obraz. Żaden współcześnie produkowany sensor nie spełnia tego warunku.

Aby rozwiązać ten problem, stosuje się technikę zdjęć o podwyższonym zakresie tonalnym HDR, HDRI (ang. *High Dynamic Range Imaging*) [131]. Technika ta polega na budowaniu finalnego zdjęcia (o podwyższonym zakresie) na podstawie kilku (kilkunastu) zdjęć składowych, każde wykonane w innych warunkach ekspozycji.

Pierwszą próbą wykorzystania techniki HDRI była fotografia Kościoła Memorial Church w Stanford wykonana przez jednego z autorów metody [42]. Finalny obraz został zbudowany z 16 obrazów składowych. Tak duża liczba zdjęć umożliwiła pokrycie całego potrzebnego zakresu tonalnego. Zdjęcia na potrzeby pomiaru luminancji i oceny olśnienia są wykonywane sprzętem fotograficznym, który standardowo umożliwia wykonanie automatycznie 3 zdjęć o różnych warunkach ekspozycji

(w trybie AEB). Takie rozwiązanie tylko rozszerza zakres tonalny. Można pokazać [133], że zastosowanie techniki HDRI do pomiarów fotometrem LMK, a więc typowym sprzętem w tym przypadku, daje możliwość rozszerzenia zakresu tonalnego o ok. 5 EV. Dzięki temu do dyspozycji przy pomiarze luminancji jest zakres rzędu ok. 13 EV.

Aby efektywnie wykorzystać ten zakres należy bardzo precyzyjnie wybrać warunki ekspozycji dla poszczególnych zdjęć składowych. Problem ten jest szeroko omawiany w literaturze przedmiotu [8, 15, 61, 62, 66]. Autorzy niniejszego opracowania zaproponowali efektywny algorytm wyznaczania czasu ekspozycji [133]. Algorytm ten był z powodzeniem wielokrotnie stosowany przy pomiarach *UGR* i *GR* na różnych stanowiskach pracy.

Wydawać by się mogło, że najprostszym rozwiązaniem rejestracji obrazów HDR na potrzeby pomiaru luminancji i oceny olśnienia byłoby wykonanie jak największej liczby zdjęć o różnych warunkach ekspozycji, a następnie zastosowanie efektywnego algorytmu rekonstrukcji obrazu o szerokim zakresie tonalnym. Spośród znanych algorytmów rekonstrukcji [131] warto wymienić kilka z nich. Algorytm Debevec i Malik [42] jest najbardziej znany i używany, jest też najczęściej opisywany w literaturze zagadnienia. Jest stosunkowo mało wrażliwy na dobór obrazów składowych i praktycznie z każdym zestawem uzyskuje się zadowalający wynik końcowy. Algorytm Mann i Picard z 1995 r. [100] był pierwszym, który umożliwił realizację techniki HDR w fotografii. Algorytm ma stosunkowo małą złożoność obliczeniową, jest jednak bardzo wrażliwy na dobór czasów naświetlania składowych obrazów. Najnowszym z wymienionych, ale także najbardziej zaawansowanym, jest algorytm Nayar i Mitsunaga z 2000 r. [105]. Jest on jednak dość rzadko wykorzystywany.

Jednocześnie stosowanych jest wiele różnych formatów zapisu obrazu HDR do pliku. Najczęściej stosowanym obecnie w fotografii jest format OpenEXR [109], wykorzystujący 48 bitów na piksel. Porównanie różnych formatów i ich właściwości można znaleźć w [167].

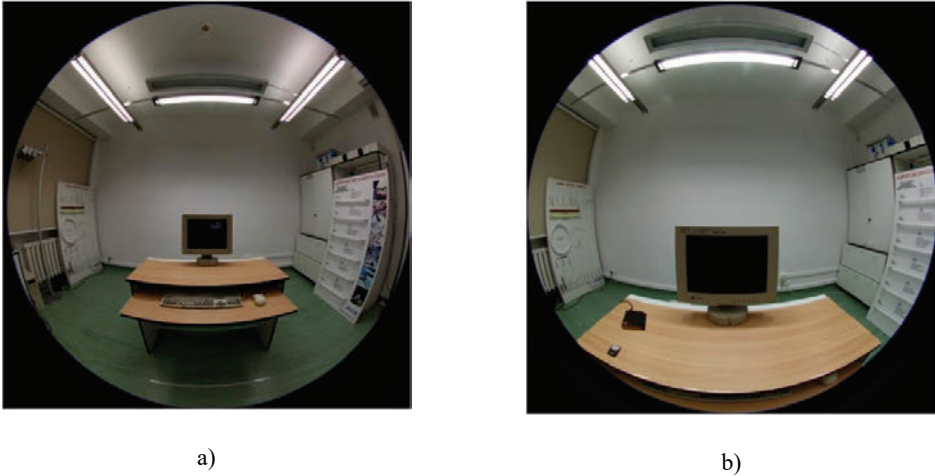
Niestety większość znanych metod rekonstrukcji była opracowywana na potrzeby fotografii i grafiki komputerowej. Bezpośrednie zastosowanie tych metod w technice pomiarowej nie zawsze przynosi pożądane efekty. Podstawowymi problemami są szumy i nieliniowość charakterystyki przetwarzania tonalnego. Niejako potwierdzeniem tych problemów jest fakt, że producenci oprogramowania do pomiarów luminancji (np. LMK) wykorzystują samodzielnie opracowane, własne algorytmy.

7. PRZYKŁADY POMIARU WSKAŹNIKÓW OLŚNIENIA *UGR* I *GR*

Autorzy niniejszego opracowania zdobywali doświadczenie także, wykonując w praktyce pomiary olśnienia na wewnętrznych i zewnętrznych stanowiskach pracy. Wybrano kilka przykładów ilustrujących opisane problemy.

Pomiar *UGR* na wewnętrznych stanowiskach pracy

Zaprezentowane pomiary były przeprowadzane w laboratorium w warunkach typowych dla pracy biurowej. Do zamodelowania warunków oświetleniowych wykorzystano następujące źródła ośnienia: oprawa TCS 260 2×54W M2 z rastrem matowym z profilowanymi lamelami oraz dwie oprawy z rastrem parabolicznym wysokopolerowanym TECTON-I 2×36 W WH. Widok pola widzenia obserwatora ze źródłami ośnienia dla obu modelowanych warunków ośnienia przykrego, wykonany fotometrem LMK z obiektywem „rybie oko”, przedstawiono na rys. 12.

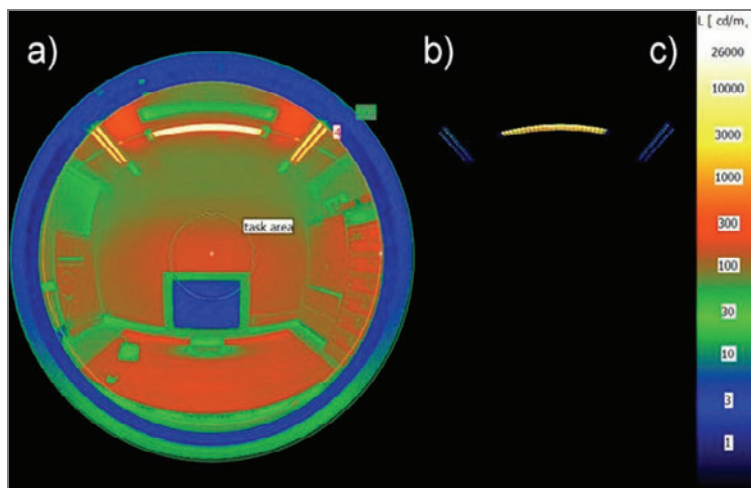


Rys. 12. Widok źródeł ośnienia w polu widzenia obserwatora wykonany fotometrem LMK
a) $UGR = 18$, b) $UGR = 21$

Fig. 12. Sources of glare in the observer's field of view. Picture made by LMK ILMD
a) $UGR = 18$, b) $UGR = 21$

Na rysunku 13 przedstawiono mapę luminancji odpowiadającą widokowi wnętrza widzianego przez obiektyw fotometru wraz z wyodrębnionym (po nałożeniu programowym „maski” odcinającej mniejsze wartości luminancji) obszarem o największych luminancjach (opraw stanowiących źródło ośnienia).

Zmiana stopnia ośnienia była realizowana przez zmianę położenia obserwatora. Przy dalszym położeniu obserwatora wyznaczona wartość $UGR = 18$, a przy bliższym położeniu $UGR = 21$. W badaniach weryfikacyjnych wyznaczonego obiektywnie wskaźnika ośnienia brała udział grupa osób w wieku 50+, które wykonywały czynności biurowe przy komputerze. Każdy z badanych oceniał subiektywnie poziom ośnienia przed i po wykonaniu zadania. Dla obiektywnego pomiaru $UGR = 18$, średnia z ocen subiektywnych wyniosła 20,4. Dla obiektywnego pomiaru $UGR = 21$, średnia z ocen subiektywnych wyniosła 21,2 [182].



Rys. 13. Przykładowe zestawienie obrazów wyświetlanych w programie systemu pomiarowym:
 a) mapa luminancji odpowiadająca widokowi wnętrza laboratorium z rys. 12b, b) „wymaskowane” pola o największym poziomie luminancji, c) skala luminancji występująca na zdjęciu

Fig. 13. An example of a set of images displayed in a measuring system:

- a) luminance map corresponding to the interior view of the laboratory from Fig. 12b,
 b) “masked” fields with the highest luminance level, c) luminance scale in the image

Pomiar *GR* na zewnętrznych stanowiskach pracy

Przeprowadzono ocenę oświetlenia na wybranych stanowiskach pracy w przedsiębiorstwie chemicznym – wytwarzanie nawozów sztucznych.

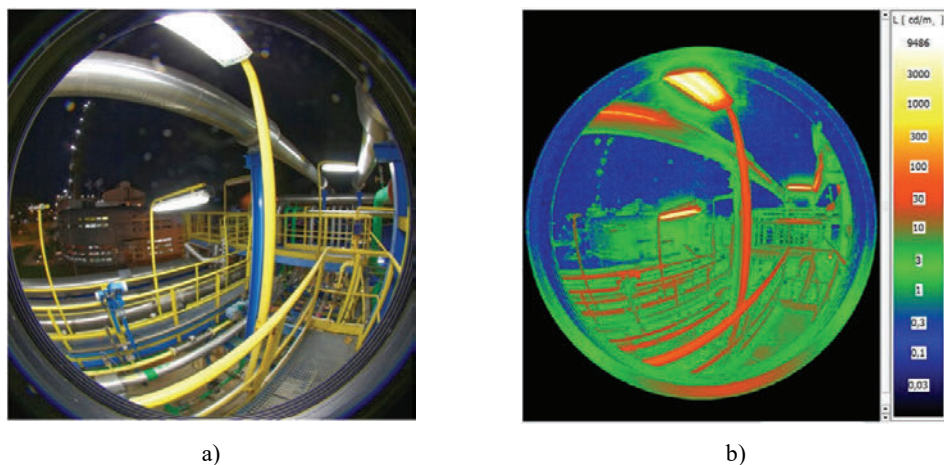
Miejsce pomiarów znajdowało się na instalacji produkcji kwasu. Czynności pracy, odczytywanie manometru. Na rysunku 14 przedstawiono widok miejsca pomiaru oraz odpowiadającą mu mapę luminancji.

Zmierzona wartość wskaźnika *GR* wyniosła 53, co odpowiada poziomowi subiektywnemu na skali „jeszcze dopuszczalne” (patrz tab. 6). Ale wartość normatywna dla tego miejsca pracy wg PN-EN 12464-2 (pkt 5.10.3 odczytywanie wskazań przyrządów) wynosi tylko 45. Oznacza to, że wartość zmierzona przekroczyła wartość normatywną i oświetlenie nie jest odpowiednio ograniczone.

Warto zwrócić uwagę na to, że kierunek obserwacji na rysunku 14 jest obrócony o 45° od kierunku przejścia po instalacji. Oznacza to, że w tym przypadku wybrano jeden z 8 wykonanych z tego punktu pomiarów, w którym wyznaczona wartość wskaźnika *GR* była największa, co jest zgodne ze znormalizowaną oceną oświetlenia na zewnętrznych stanowiskach pracy.

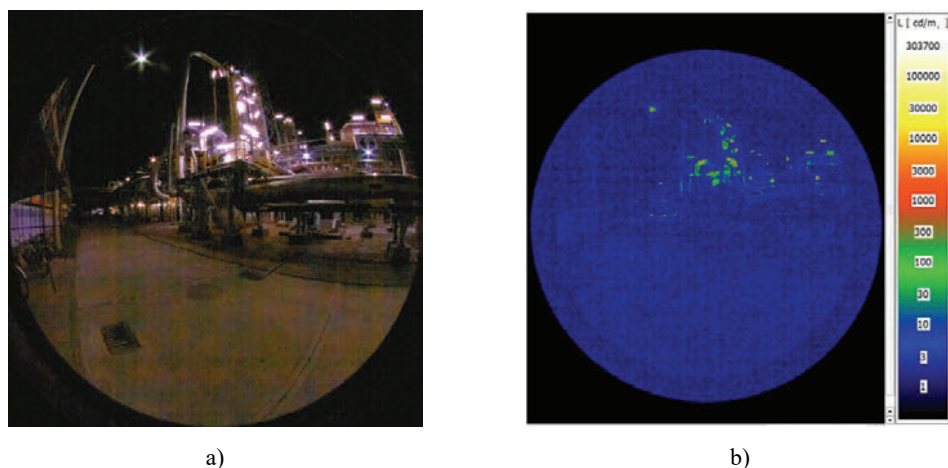
Inny przykład to miejsce pomiarów, które znajdowało się w strefie komunikacyjnej przy instalacji półspalania, przedstawione na rys. 15. Zmierzona wartość wskaźnika *GR* wyniosła 37, co odpowiada poziomowi subiektywnemu „niezauważalne”. Wartość normatywna dla tego miejsca pracy wg PN-EN 12464-2 (pkt 5.1.1 drogi wy-

łącznie dla pieszych) wynosi 50. Oznacza to, że wartość zmierzona nie przekroczyła wartości normatywnej, a oświetlenie jest odpowiednio ograniczone.



Rys. 14. Widok miejsca pomiaru oraz odpowiadająca mu mapa luminancji

Fig. 14. The view of the place where the measurement was made and the corresponding luminance map



Rys. 15. Widok miejsca pomiaru przy instalacji półspalania oraz odpowiadająca mu mapa luminancji

Fig. 15. The view of the place where the measurement was made (semi-firing installation) and the corresponding luminance map

Warto zwrócić uwagę na to, że w przypadku pokazanym na rysunku 15 widok obejmuje prawie cały zakład przemysłowy i w polu widzenia znalazła się olbrzymia liczba źródeł światła. Ocena symulacyjna oświetlenia w takiej sytuacji jest całkowicie

niemożliwa. Jedynym i do tego skutecznym sposobem oceny olśnienia jest pomiar wskaźnika *GR*.

8. PODSUMOWANIE

Problem olśnienia znany jest człowiekowi praktycznie od zawsze. Światło słoneczne daje możliwość wykonywania dowolnych czynności, ale także może powodować olśnienie. Problem olśnienia powodowanego światłem słonecznym stanowi duże wyzwanie dla architektów, dlatego opracowuje się metody oceny olśnienia pochodzącego od okien. Z tego względu ten aspekt oceny olśnienia nie był poruszany w niniejszym rozdziale. Nie mamy wpływu na naturalne źródło światła, jakim jest słońce, a ograniczanie olśnienia we wnętrzach od światła dziennego polega na odpowiedniej konstrukcji okien, ich wymiarów i usytuowania oraz stosowania odpowiednich żaluzji czy rolet. Prace normalizacyjne nie objęły dotychczas olśnienia od światła dziennego, ale badania są prowadzone w wielu ośrodkach, a dorobek publikacyjny jest bardzo duży [1, 87, 95, 103, 110, 160, 168, 169].

Inaczej jest z instalacjami oświetlenia sztucznego. Tutaj możemy wpłynąć na rozchodzenie się światła i świadomie próbować olśnienie ograniczać. Ograniczać nie tylko dlatego żeby podnieść komfort człowieka, ale także, a może przede wszystkim dlatego, że olśnienie może stać się czynnikiem zagrożenia i np. przyczyną pośrednią wypadku podczas pracy [172, 175]. Aby jednak to świadome ograniczanie olśnienia było skuteczne, to musi istnieć możliwość wiarygodnej oceny tego zjawiska.

Ocena olśnienia jest zagadnieniem bardzo trudnym. Jest to zadanie interdyscyplinarne wymagające wiedzy z fizjologii widzenia, psychologii, socjologii i techniki świetlnej. Projektant może próbować ograniczać olśnienie, stosując odpowiednie oprawy oświetleniowe, które są odpowiednio rozmieszczone w polu widzenia człowieka. Osoba próbująca ocenić olśnienie w określonym miejscu może dokonać tego różnymi metodami. Najskuteczniejszą z nich jest obiektywny pomiar, który zweryfikuje projekt instalacji oświetleniowej i oceni rzeczywiste warunki oświetleniowe – także te, które powstały na skutek różnych modyfikacji poprojektowych, czasem niezgodnych z zasadami sztuki inżynierskiej. Wydaje się, że jedyną skuteczną współcześnie metodą oceny olśnienia jest pomiar z wykorzystaniem matrycowych mierników luminancji (ILMD). Znane są wcześniejsze próby, np. z wykorzystaniem cyfrowej kamery otworkowej [11, 12], jednak dopiero pojawienie się na rynku rozwiązań typu ILMD dało szansę realizować te pomiary w sposób efektywny i skuteczny.

Autorzy niniejszego opracowania, wykorzystując własne wieloletnie doświadczenia, starali się pokazać jak złożonym procesem jest ocena olśnienia, mimo rozwoju sprzętu pomiarowego i doskonalenia oprogramowania. Warto zwrócić uwagę chociażby na liczną grupę wskaźników olśnienia, z których praktycznie każdy jest nadal rozwijany w różnych ośrodkach naukowych. Brak jednego wskaźnika uniwersalnego

daje w tym przypadku możliwość prowadzenia ciekawych badań, ale pokazuje także potrzebę szeroko zakrojonej unifikacji.

Z drugiej strony, rozwój technologii oświetleniowej sprawia, że ciągle tylko wydaje nam się, że potrafimy skutecznie ocenić pomiarowo oślnienie. Pokora jest tutaj nieodzowną cnotą. Pojawienie się nowych źródeł światła, jak np. źródeł LED, sprawia, że pojawiają się zupełnie nowe wyzwania naukowe. Potrzeba rozwiązania nowych, pojawiających się problemów pomiarowych nie jest jedynym zadaniem. Można zauważyć powrót do badań i analiz fizjologicznych mechanizmów odczucia oślnienia. Powraca pytanie o addytywność zjawiska. Czy można analizować odczucie oślnienia, wykorzystując odpowiedni wskaźnik i jednocześnie będzie on po prostu sumował luminancje odpowiednich obszarów kątowych w polu widzenia. Oczywiście z uwzględnieniem kierunku obserwacji i odpowiedniego współczynnika położenia. Dotychczasowe badania dla konwencjonalnych źródeł światła potwierdzały taką możliwość i użyteczność znanych wskaźników. Przeprowadzone badania na grupie 50 osób [4] dla źródeł LED o dużej luminancji pokazały, że oślnienie przykre w centralnym polu widzenia zależy w tym przypadku, przede wszystkim od lokalnych zmian luminancji i kontrastu. Ważniejsza jest forma granicy kontrastu niż sumaryczna ilość światła wpadająca do oka. Niestety takich zależności znane wskaźniki oślnienia nie uwzględniają.

Autorzy niniejszego opracowania mają nadzieję pobudzić zainteresowania pomiarowe zagadnieniami oślnienia i sprawić, że coraz większa grupa osób będzie nie tylko zdawała sobie sprawę z wagi problemu, ale także potrafiła skutecznie to oślnienie ocenić.

Opracowano na podstawie badań własnych Autorów oraz na podstawie wyników prac realizowanych w ramach II i III etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach: 2011–2013 ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego/Narodowego Centrum Badań i Rozwoju oraz w latach 2014–2016 finansowanego ze środków Ministerstwa Pracy i Polityki Społecznej. Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

LITERATURA

- [1] AGHEMO C, CHIARAVIGLIO L., PELLEGRINO A., *Assessment of discomfort glare in daylight rooms with shading devices: results from a field study and comparison with software simulations*, Proceedings of Conference LUX EUROPA 2009, Istanbul, 443–450.
- [2] AKASHI Y, MURAMATSU R, KANAYA S., *Unified Glare Rating (UGR) and subjective appraisal of discomfort glare*, Lighting Research & Technology, 1996, 28(4), 199–206.
- [3] AYAMA M., *Assessing Glare Based on LED Lighting*, 10th China International Forum on Solid State Lighting (ChinaSSL), 10–12 Nov. 2013, DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/SSLCHINA.2013.7177354>
- [4] BARGARY G., JIA Y., BARBUR J.L., *Mechanisms for discomfort glare in central vision*, Investigative Ophthalmology & Visual Science, 2015 56(1), 464–471. DOI: <http://dx.doi.org/10.1167/iov.14-15707>
- [5] BĄK J., *Obliczanie oświetlenia ogólnego wewnątrz*, WNT, Warszawa 1983.

- [6] BELLIA L., CESARANO E., IULIANO G., SPADA G., *Daylight glare: a review of discomfort indexes*, In: Visual Quality and Energy Efficiency in Indoor Lighting: Today for Tomorrow Rome (IT), 2008.
- [7] BELLIA L., BISEGNA F., SPADA G., *Lighting in indoor environments: Visual and non-visual effects of light sources with different spectral power distributions*, Building and Environment, 2011, 46, 1984–1992, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.04.007>
- [8] BELLIA L., SPADAA G., PEDACE A., *Lit environments quality: A software for the analysis of luminance maps obtained with the HDR imaging technique*, Energy and Buildings, 2013, 67, 143–152, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.08.007>
- [9] BENNETT C.A., *Discomfort Glare: Concentrated Sources – Parametric Study of Angularly Small Sources*, Journal of the Illuminating Engineering Society, 1977, 7(1), 2–15, DOI: <https://doi.org/10.1080/00994480.1977.10748959>
- [10] BERMAN S.M., BULLIMORE M.A., JACOBS R.J., BAILEY L.L., GANDHI N., *An Objective-Measure of Discomfort Glare*, Journal of the Illuminating Engineering, 1994, 23, 40–49, DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00994480.1994.10748079>
- [11] BŁASZCZAK U.J., *Pinhole digital camera as a discomfort glare meter*, Przegląd Elektrotechniczny, 2007, 83(5), 81–85.
- [12] BŁASZCZAK U.J., *Application of pinhole digital camera in size and spatial arrangement of glare sources measurements in an exemplary didactic room*, Przegląd Elektrotechniczny, 2008, 84(8), 122–124.
- [13] BŁASZCZAK U.J., *Metoda pomiaru wskaźnika UGR z wykorzystaniem kamery z detektorem CCD*, Pomiary–Automatyka–Kontrola, 2010, 56(2), 150–153.
- [14] BŁASZCZAK U.J., *Method for evaluating discomfort glare based on the analysis of a digital image of an illuminated interior*, Metrology and Measurement Systems, 2013, 20(4), 623–634.
- [15] BOULENGUEZ, P. GAUDAIRE F., MARTINSONS C., NOÉ N., CARRÉ S., SIMONOT L., *Imaging Radiometry – a Fast and Robust Shutter Speed Search Algorithm*, Proceedings of the 28th Session of the CIE, June 28–July 4, 2015, Manchester, UK, Vol. 1, Part 2, 1385–1388.
- [16] BORISUIT A., *The Impact of Light Including Non-Image Forming Effects on Visual Comfort (PhD thesis)*, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, 2013.
- [17] BULLOUGH J.D., BRONS J.A., QI R., REA M.S., *Predicting discomfort glare from outdoor lighting installations*, Lighting Research & Technology, 2008, 40, 225–242.
- [18] BULLOUGH J.D., *Spectral sensitivity for extrafoveal discomfort glare*, J. Mod. Opt., 2009, 56, 1518–1522.
- [19] BULLOUGH J.D., *Luminance versus Luminous Intensity as a Metric for Discomfort Glare*, SAE Technical Paper 2011-01-0111, 2011, DOI: <http://dx.doi.org/10.4271/2011-01-0111>
- [20] CAI H., CHUNG T.M., *Improving the quality of high dynamic range images*, Lighting Research & Technology, 2011, 43(1), 87–102, DOI: <http://dx.doi.org/1177/1477153510371356>
- [21] CAI H., CHUNG T., *Evaluating discomfort glare from non-uniform electric light sources*, Lighting Research & Technology, 2013, 45(3), 267–294.
- [22] CARLUCCI S., CAUSONE F., DE ROSA F., PAGLIANO L., *A review of indices for assessing visual comfort with a view to their use in optimization processes to support building integrated design*, Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015, 47, 1016–1033.
- [23] CHEN J., *Effects of Headlamp Glare Exposure on Glare Recovery and Discomfort (M.S. thesis)*, Troy, NY, Rensselaer Polytechnic Institute. 2004.
- [24] CIE, International Commission on Illumination (CIE), *Commission Internationale de l’Eclairage Proceedings*, Cambridge University Press, 1924.
- [25] CIE, *Glare and Uniformity in Road Lighting Installations*, CIE Publication No. 031, International Commission on Illumination (CIE), Vienna 1976.

- [26] CIE, *Discomfort glare in the interior working environment*, CIE Publication No. 55, International Commission on Illumination (CIE), Vienna 1983.
- [27] CIE, *Guide on Interior Lighting*, CIE standard 29.2, International Commission on Illumination (CIE), Vienna 1986.
- [28] CIE, *Glare evaluation system for use within outdoor sports and area lighting*, CIE Publication No. 112, International Commission on Illumination (CIE), Vienna 1994.
- [29] CIE, *Discomfort Glare in Interior Lighting*, CIE Publication No. 117 (TC 3–13), International Commission on Illumination (CIE), Vienna 1995.
- [30] CIE, *Guide for Lighting Exterior Work Areas*, CIE Publication No. 129, International Commission on Illumination (CIE), Vienna 1998.
- [31] CIE, *Collection on Glare. Equations for Disability Glare*, CIE Publication No. 146, International Commission on Illumination (CIE), Vienna 2002.
- [32] CIE, *Collection on Glare. Glare from Small, Large and Complex Sources*, CIE Publication No. 147, International Commission on Illumination (CIE), Vienna 2002.
- [33] CIE, *Guide on the Limitation of the Effects of Obtrusive Light from Outdoor Lighting Instalations*, CIE Publication No. 150, International Commission on Illumination (CIE), Vienna 2003.
- [34] CIE, ILV: *International Lighting Vocabulary*, Draft standard CIE S 017/E, International Commission on Illumination (CIE), Vienna 2011.
- [35] CIE, *Review of lighting quality measures for interior lighting with LED lighting systems*, CIE 205:2013, International Commission on Illumination (CIE), Vienna 2013.
- [36] CIE, *Research roadmap for healthful interior lighting applications*, CIE 218:2016, International Commission on Illumination (CIE), Vienna 2016.
- [37] CLEAR R.D., *Discomfort glare: what do we actually know?* *Lighting Research & Technology*, 2013, 45(2), 141–158.
- [38] COHEN M., WALLACE J., *Radiosity and Realistic Image Synthesis*, Academic Press, 1993.
- [39] ČADIK M., WIMMERB M., NEUMANN L., ARTUSI A., *Evaluation of HDR tone mapping methods using essential perceptual attributes*, *Computers & Graphics*, 2008, 32, 330–349.
- [40] DE BOER J.B., *Visual perception in road traffic and the field of vision of the motorists*, [in:] *Public Lighting* (de Boer J.B. ed.), Philips Technical Library, Eindhoven 1967, 11–96.
- [41] DE BOER J.B., *Quality criteria for the passing beam of motocar headlights*, Presented at the GTB Meeting in Walldorf, West Germany, 1973.
- [42] DEBEVEC P., MALIK J., *Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs*, Proceedings of SIGGRAPH'97, August 1997. <http://www.pauldebevec.com/Research/HDR/> (dostęp 29.07.2017).
- [43] *Lighting design software DIALux*. <https://www.dial.de/en/software/dialux/>, (dostęp 29.07.2017).
- [44] DUTRÉ P., BEKAERT P., BALA K., *Advanced Global Illumination*, A K Peters, 2003.
- [45] *Dynamic Range In Digital Photography*, [in:] *Cambridge in Colour*, <http://www.cambridgeincolour.com/tutorials/dynamic-range.htm/>, (dostęp 15.05.2012).
- [46] EBLE-HANKINS M., *Subjective impression of discomfort glare from sources of non-uniform luminance*, Architectural Engineering – Dissertations and Student Research. Paper 1., 2008, University of Nebraska –Lincoln, Available from: <http://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1000&context=archengdiss>, (dostęp 2017-01-18).
- [47] EBLE-HANKINS M.L., WATERS C.E., *Subjective impressions of discomfort glare from sources of non-uniform luminance*, *Leukos* 2009, 6, 51–77.
- [48] *EM spectrum.svg*. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2521356>, [licencja CC BY-SA 3.0].
- [49] European Lighting Standard EN-13201-4: 2016, *Road lighting*. Part 4. *Methods of measuring lighting performance*.
- [50] European Lighting Standard EN-13201-4: 2016, *Road lighting*. Part 5. *Energy performance indicators*.

- [51] European Technical Report CEN/TR-13201-4: 2016, *Road lighting*. Part 1. *Selection of lighting classes*.
- [52] *evalglare.pdf*. RADSITE radiance-online.org. <https://www.radiance-online.org/learning/documentation/manual-pages/pdfs/evalglare.pdf/view>, (dostep 29.07.2017).
- [53] FLANNAGAN M.J., *Subjective and objective aspects of headlamp glare: effects of size and spectral power distribution*, The University of Michigan Report No. UMTRI-99-36, November 1999.
- [54] FRY G.A., *A re-evaluation of the scattering theory of glare*, *Illum. Eng.*, 49(2), 98–903.
- [55] FUNKE C., SCHIERZ C.H., *Extension of the unified glare rating formula for non-uniform led luminaires*, Proceedings of 28th CIE Session 2015, Manchester, UK, 27 June–4 July, 2015, 1471–1480.
- [56] FUNKE C., SCHIERZ C.H., *Extension of the UGR formula for non-uniform led luminaires*, Proceedings of Lux Junior 2015, 25–27 September 2015, Dörfeld/Ilmenau Germany.
- [57] GEERDINCK L.M., *Glare perception in terms of acceptance and comfort* [graduation report], Eindhoven University of Technology, 2012.
- [58] GEERDINCK L.M., VAN GHELUWE J.R., VISSENBERG M.C.J.M., *Discomfort glare perception of non-uniform light sources in an office setting*, *Journal of Environmental Psychology*, 2014, 39, 5–13.
- [59] GELLATLY A.W., WEINTRAUB D.J., *User reconfigurations of the de Boer rating scale for discomfort glare*, UMTRI-90-20 Report, The University of Michigan Transportation Research Institute, May 1990.
- [60] GLASSNER A. (ed.), *An Introduction to Ray Tracing*, Academic Press, Morgan Kaufmann, 1989.
- [61] GROSSBERG M.D., NAYAR S.K., *What is the space of camera response functions?* Proceedings of the 2003 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '03), Vol. 2, 18–20.
- [62] GROSSBERG M.D., NAYAR S.K., *Modeling the Space of Camera Response Functions*, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2004, 26(10), 1272–1282.
- [63] GUTH S.K., MCNEILS J.F., *A discomfort glare evaluator*, *Illuminating Engineering*, 1959, 54(6), 398–403.
- [64] GUTH S.K., MCNEILS J.F., *Further data on discomfort glare from multiple sources*, *Illuminating Engineering*, 1961, 56(1), 46–47.
- [65] GUTH S.K., *A method for the evaluation of discomfort glare*, *Illuminating Engineering*, 1963, 57, 351–364.
- [66] HAMEY L.G.C., *Simultaneous Estimation of Camera Response Function, Target Reflectance and Irradiance Values*, Proceedings of IEEE Conference Digital Image Computing: Techniques and Applications (DICTA '05), 6–8 Dec. 2005, Queensland, Australia, DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/DICTA.2005.75>
- [67] HARGROVES R.A., HENRY I.C., TREZZI M., *Glare evaluation of tennis court floodlighting*, *Lighting Research & Technology*, 1986, 18(4), 157–160.
- [68] HIGGINS K.E., WHITE J.M., *Transient adaptation at low light levels: Effects of age*, Proceedings-Vision at Low Light Levels: EPRI/LRO Fourth International Lighting Research Symposium. EPRI, Palo Alto, CA; Consolidated Edison Co. of New York, Bronx, NY; and Osram-Sylvania Products, Inc., Danvers, MA, TR-110738. 1999, 173–185.
- [69] HIRNING M.B., ISOARDI G.L., COYNE S., GARCIA HANSEN V.R., COWLING I., *Post occupancy evaluations relating to discomfort glare: A study of green buildings in Brisbane*, *Building and Environment*, 2013, 59, 349–357, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.08.032>
- [70] HIRNING M.B., ISOARDI G.L., COWLING I., *Discomfort glare in open plan green buildings*, *Energy and Buildings*, 2014, 70, 427–440, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.053>
- [71] HIRNING M.B., *The application of luminance mapping to discomfort glare: a modified glare index for green buildings* (PhD thesis), Queensland University of Technology, 2014.

- [72] HOLLADAY L.L., *The fundamentals of glare and visibility*, J. Opt. Soc. Amer., 1926(12), 271–319.
- [73] HOLLADAY L.L., *Action of a light source in the field of view in lowering visibility*, J. Opt. Soc. Amer., 1927(14), 271–319.
- [74] HOPKINSON R.G., *The multiple criterion technique of subjective appraisal*, Quarterly Journal of Experimental Psychology, 1950(2, 3), 124–131.
- [75] HOPKINSON R.G., *Evaluation of glare*, Illum. Eng., 1957, 52(6), 305–316.
- [76] HOPKINSON R.G., *Glare from daylighting in buildings*, Appl. Ergon., 1972, 3, 206–215, DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0003-6870\(72\)90102-0](http://dx.doi.org/10.1016/0003-6870(72)90102-0)
- [77] IACOMUSSI P., RADIS M., ROSSI G., ROSSI L., *Visual Comfort with LED Lighting*, Energy Procedia, 2015, 78, 729–734.
- [78] IMAGIA, *W kierunku neurokognitywnej teorii obrazu. Widzenie*, <http://new.afterimagia.pl/widzenie/> (dostęp 29.07.2017).
- [79] IRIKURA T., TOYOFUKU Y., AOKI Y., *Recovery time of visual acuity after exposure to a glare source*, Lighting Research & Technology, 1999, 31(2), 57–61.
- [80] IWATA T., TOKURA M., *Position Index for a glare source located below the line of vision*, Lighting Research & Technology, 1997, 29(3), 172–178.
- [81] JACOBSON R.E., RAY S.F., ATTRIDGE G.G, AXFORD N.R., *Manual of Photography, Photographic and Digital Imaging*, Ninth Edition, Focal Press, 2000.
- [82] JAKUBIEC J.A., REINHART C.F., *The “adaptive zone” – a concept for assessing discomfort glare throughout daylight spaces*, Lighting Research & Technology, 2012, 44(2), 149–170.
- [83] JANOSIK E., *Badanie skutków oślnienia w zależności od lokalizacji źródeł oślnienia*, Rozprawa doktorska, Instytut Medycyny Pracy i Zdrowia Środowiskowego, Sosnowiec 2001.
- [84] KASAHARA T., AIZAWA D., IRIKURA T., MORIYAMA T., TODA M., IWAMOTO M., *Discomfort glare caused by white LED light sources*, Journal of Light and Visual Environment, 2006, 30(2), 95–103.
- [85] KHANH T.Q., BODROGI P., VINH Q.T., WINKLER H. (ed), *LED lighting: technology and perception*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., KgaA, 2015.
- [86] KIM W., KOGA Y., *Effect of local background luminance on discomfort glare*, Building and Environment, 2004, 39, 1435–1442.
- [87] KIM W., *Evaluation of discomfort glare from daylight*, Proceedings of CIE 26th Session, Beijing, July 2007, Vol. 1, D3-D170.
- [88] KIM W., AHN H.T., KIM J.T., *A first approach to discomfort glare in the presence of non-uniform luminance*, Building and Environment, 2008, 43, 1953–1960, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.11.016>
- [89] KIM W., HAN H., KIM J.T., *The position index of a glare source at the borderline between comfort and discomfort (BCD) in the whole visual field*, Building and Environment, 2009, 44, 1017–1023.
- [90] KIM W., KIM J.T., *Effect of Background Luminance on Discomfort Glare in Relation to the Glare Source Size*, Indoor Built Environment, 2010, 19(1), 175–183.
- [91] KIM W., KIM J.T., *A Position Index Formula for Evaluation of Glare Source in the Visual Field*, Indoor Built Environment, 2011, 20(1), 47–53.
- [92] KOLB H., FERNANDEZ W., NELSON R. (ed.), *Webvision. The Organization of the Retina and Visual System*, University of Utah Health Sciences Center, Salt Lake City (UT) 2016. Dostępne w: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK11530/> (dostęp 29.07.2017), także <http://webvision.med.utah.edu> (dostęp 29.07.2017).
- [93] LEHNERT P., *Disability and discomfort glare under dynamic conditions - the effect of glare stimuli on the human vision*, Proceedings of Pal 2001 – Progress In Automobile Lighting, Held Laboratory of Lighting Technology, September 2001, Vol. 9, 582–592.
- [94] LEE C.M., KIM H., CHOI D.S., *A study on the estimation of discomfort glare for LED luminaires*, Proceedings of CIE 26th Session, Beijing, July 2007, Vol. 1, D3-33-36.

- [95] LEE J.S., SOO K.B., *A development of the tool for evaluation on discomfort glare from windows*, Proceedings of CIE 26th Session, Beijing, July 2007, Vol. 1, D3-204.
- [96] *LMK 5 Luminance Measuring Video Photometer*, Documentation and Instruction Manual of the TechnoTeam's LMK Photometer System, Available also from <http://www.technoteam.de/> (dostęp 15.12.2014).
- [97] *LMK Mobile Advanced*, Documentation and Instruction Manual of the TechnoTeam's LMK Photometer System, Available also from <http://www.technoteam.de/> (dostęp 15.12.2014).
- [98] LOU D., DENG S., BIAN J., VAN DER BURGT P.J.M., *Evaluation of Glare from Non-Uniform Indoor Luminaires*, Proceedings of 28th CIE Session, Manchester 2015, 1860–1869.
- [99] LUCKIESH M., GUTH S.K., *Brightness in visual field at borderline between comfort and discomfort (BCD)*, Illum. Eng., 1949, 44(11), 650–670.
- [100] MANN S., PICKARD R.W., *On being "undigital" with digital cameras: extending dynamic range by combining differently exposed pictures*, Proceedings of IS&T's 48th Annual Conference, Washington DC, 7–11.05.1995, 422–428.
- [101] *A Method for Estimating Discomfort Glare from Exterior Lighting Systems*, ASSIST recommends Vol. 9, Issue 1, April 2011, Rensselaer Polytechnic Institute, 2011.
- [102] MOOSMANN C., WIENOLD J., WAGNER A., WITTEW V., *Age effects on glare perception under daylight conditions*, Proceedings of Conference LUX EUROPA 2009, Istanbul, 439–442.
- [103] NAKAMURA Y., SHIMAZAKI W., HASHIMOTO T., *Method of discomfort glare estimation applicable to wide range source sizes Glare estimation system based on luminance image*, Proceedings of CIE 26th Session, Beijing, July 2007, Vol. 1, D3-41.
- [104] NAKAMURA Y., TAKAHASHI R., SASABE K., *Prediction of Discomfort Glare of a Non-Uniform Light Source by Use of Its Luminance Image*, Proceedings of 28th CIE Session, Manchester 2015, 400–408.
- [105] NAYAR S.K., MITSUNAGA T., *High Dynamic Range Imaging: Spatially Varying Pixel Exposures*, Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2000, DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/CVPR.2000.855857>
- [106] NAZZAL A., GÜLER Ö., ONAYGIL S., *Subjective experience of discomfort glare in a daylit computerized office in Istanbul and its mathematical prediction with the DGIN method*, The bulletin of the Istanbul Technical University, 2004, 54(3), 96–107.
- [107] [Nonne 2013] NONNE J., RENOUX D., ROSSI L., *Metrology for solid-state lighting quality*, Proceedings of 16th International Congress of Metrology, 2013 (14004), DOI: <http://dx.doi.org/10.1051/metrology/201314004>
- [108] NUTTING P.G., *Effects of brightness and contrast in vision*, Transact., IES, 1916, New York, 11, 939–946.
- [109] OpenEXR, <http://www.openexr.com/> (dostęp 29.07.2017).
- [110] OSTERHAUS W., *Analysis of luminance histograms for the assessment of discomfort glare in daylit offices*, Proceedings of Balkan Light, 2008, 155–164.
- [111] OSTERHAUS W., VEITCH J.A., *Workshop on discomfort glare: final report*, Paper presented at 27th Session of the International Commission on Illumination, 2011 Sun City, South Africa.
- [112] PAWLAK A., ZAREMBA K., *Rozkład błędów przy projektowaniu pośredniego oświetlenia elektrycznego za pomocą opraw kwadratowych*, Prace Instytutu Elektrotechniki, 2012, 255, 79–91.
- [113] PARSONS J.H., *Glare, its causes and effects*, The Illuminating Engineer, 1910, 3, 99–103.
- [114] PICKARD G.E., SOLLARS P.J., *Intrinsically Photosensitive Retinal Ganglion Cells*, In: B. Nilius et al. (editors), *Reviews of Physiology, Biochemistry and Pharmacology*, Part 162, Springer, 2012.
- [115] PHARR M., WENZEL J., HUMPHREYS G., *Physically Based Rendering. From Theory to Implementation*, 3rd Edition, Morgan Kaufmann, 2016.
- [116] Polska Norma: PN-E: 02033: 1984. *Oświetlenie wnętrz światłem elektrycznym*.

- [117] Polska Norma: PN-E: 01005: 1990. *Technika świetlna. Terminologia.*
- [118] Polska Norma: PN-EN 12464-1: 2012. *Światło i oświetlenie – Oświetlenie miejsc pracy. Część 1: Miejsca pracy we wnętrzach.*
- [119] Polska Norma: PN-EN 12464-2: 2014-05. *Światło i oświetlenie – Oświetlenie miejsc pracy. Część 2: Miejsca pracy na zewnątrz.*
- [120] Polska Norma: PN-EN 12193: 2008. *Światło i oświetlenie – Oświetlenie w sporcie.*
- [121] Polska Norma: PN-EN 13201-2: 2016-03. *Oświetlenie dróg. Część 2: Wymagania eksploatacyjne.*
- [122] PORSCH T., WALKING A., SCHMIFT F., SCHIERZ C., *Measurement of the threshold increment (TI) in road lighting based on using ILMD*, Proceedings of CIE 2014 Conference Lighting Quality and Energy Efficiency, Kuala Lumpur, Malaysia, 23–26 April 2014, 237–243.
- [123] PULPITLOVA J., DETKOVA P., *Impact of the cultural and social background on the visual perception in living and working perception*, Proceedings of The International Symposium Design of amenity, Fukuoka, Japan, 5–9.10.1993, 216–227.
- [124] PUTNAM R.C., FAUCETT R.E., *The threshold of discomfort glare at low adaptation levels*, Illuminating Engineering, 1951, 46(10), 505–510.
- [125] *RADSITE radiance* – online.org. <https://www.radiance-online.org/> (dostęp 29.07.2017).
- [126] RAY S.F., *Applied Photographic Optics*, Oxford Focal Press, 2002.
- [127] RAYNHAM P., OSTERHAUS W., DAVIS M., *Mapping of Brain Functions and Spatial Luminance Distributions as Innovative Tools for Assessing Discomfort Glare in the Built Environment*, ARCC Journal, 2007, 4(1), 87–92, DOI: <http://dx.doi.org/10.17831/enq:arcc.v4i1.59>
- [128] REA M.S., *Vision and Perception*, In: *Lighting Handbook, Reference & Application*, IES of North America, IESNA, New York 1993, 69–101.
- [129] REA M.S., *The lumen seen in a new light: Making distinctions between light, lighting and neuroscience*, Lighting Research & Technology, 2015, 47(3), 259–280.
- [130] RELUX <https://relux.com/en/> (dostęp 29.07.2017).
- [131] REINHARD E., WARD G., PATTANAIK S., DEBEVEC P., *High Dynamic Range Imaging*, Morgan Kaufmann, 2006.
- [132] ROSENHAHN E., LAMPEN M., *New Investigation of the Subjective Glare Effect of Projection Type Headlamps*, SAE Technical Paper 2004.01.1281, 2004, DOI: <http://dx.doi.org/10.4271/2004-01-1281>.
- [133] SAWICKI D., WOLSKA A., *Algorithm of HDR image preparation for discomfort glare assessment*, Przegląd Elektrotechniczny, 2013, 89(2a), 87–90.
- [134] SAWICKI D., WOLSKA A., *UGR for exterior working environment? Why not*, Proceedings of the 28th Session of the CIE, June 28–July 4, 2015, Manchester UK., Vol. 1, Part 2, (CIE 216:2015, ISBN 978-3-902842-55-8), 1617–1622.
- [135] SAWICKI D., WOLSKA A., *Discomfort glare prediction by different methods*, Lighting Research & Technology, 2015, 47(6), 658–671, DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/1477153515589773>
- [136] SAWICKI D., WOLSKA A., *Problems related to the angular resolution of the ILMD for GR index determination*, Przegląd Elektrotechniczny, 2016, 92(9), 173–177, DOI: <http://dx.doi.org/10.15199/48.2016.09.44>.
- [137] SAWICKI D., WOLSKA A., *The unified semantic glare scale for GR and UGR indexes*, Proceedings of the 2016 IEEE Lighting Conference of the Visegrad Countries (Lumen V4), Karpacz, 13–16.09.2016, DOI: 10.1109/LUMENV.2016.7745536.
- [138] SCHIER G.H., HANSELAER P., BRACKE P., DECONICK G., RYCKAERT W.R., *Effect of non-uniformity and luminance contrast on the acceptability and the sensation of discomfort of the source brightness*, Proceedings Experiencing light 2014, International conference on the effects of light on wellbeing, Eindhoven, The Netherlands, 10–11 November 2014, 24–27.
- [139] SCHEIR G.H., HANSELAER P., BRACKE P., DECONINCK G., RYCKAERT W.R., *Calculation of the Unified Glare Rating based on luminance maps for uniform and non-uniform light sources*, Building and Environment, 2015, 84, 60–67, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.10.027>

- [140] SCHMIDT-CLAUSEN H.J., BINDELS J.H., *Assessment of discomfort glare in motor vehicle lighting*, *Lighting Research & Technology*, 1974, 6(2), 79–88.
- [141] SCHUBERT E.F., *Light emitting diodes, chapter 16. Human eye sensitivity and photometric quantities*, Cambridge University Press, UK, 2006, <http://www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org/Sample-Chapter.pdf>, (retrieved 2012.05.15).
- [142] SHUSTER J., *Addressing Glare in Solid-State Lighting*, White Paper. January 2014, <http://www.ephotoslighting.com/wp-content/uploads/2014/01/Addressing-Glare.pdf>, (dostęp: 20.07.2017).
- [143] SŁOMIŃSKI S., *Modern measurements methods in the study of discomfort glare in street LED lighting*, Proceedings of the Lumen V4 Conference, Visegrád, Hungary, 2014.
- [144] SŁOMIŃSKI S., *Identifying problems with luminaire luminance measurements for discomfort glare analysis*, *Lighting Research & Technology*, 2016, 48(5), 573–588, DOI: 10.1177/1477153515596374.
- [145] STILES W.S., *The effects of glare on the brightness difference threshold*, Proceedings of the Royal Society (London), 1929, 104, Ser. B, 322–351, DOI: <http://dx.doi.org/10.1098/rspb.1929.0012>
- [146] STILES W.S., *The nature and effects of glare*, *Illuminating Engineer*, 1929, 22, 304–312.
- [147] [Stiles 1930] STILES W.S., *The scattering theory of the effect of glare on the brightness difference threshold*, Proceedings of the Royal Society (London), 1930, 105, Ser. B, 131–146, DOI: <http://dx.doi.org/10.1098/rspb.1929.0033>.
- [148] [Stiles 1937] STILES W.S., CRAWFORD BH., *The effects of a glaring light source on extrafoveal vision*, Proceedings of the Royal Society (London), 1937, 122, Ser. B, 255–280, DOI: <http://dx.doi.org/10.1098/rspb.1937.0024>
- [149] STOPYRA W., *Widzenie barw*, *Okulistyka*, 2012, 9(3), 4–15.
- [150] SUFFERN K., *Ray Tracing from the Ground Up*, A K Peters, CRC Press, 2007.
- [151] ŠKODA J., SUMEC S., BAXANT P., *Position index in discomfort glare calculation*, Proceedings of the 12th European Lighting Conference LUX Europa 2013, Kraków Poland, 17–19 September 2013, 755–760.
- [152] TAKAHASHI H., KOBAYASHI Y., ONDA S., IRIKURA T., *Position index for the matrix light source*, *Journal of Light and Visual Environment*, 2007, 31(3), 128–133.
- [153] TAKAHASHI H., IRIKURA T., MORIYAMA T., TODA M., IWAMOTO M., *Discomfort glare and annoyance caused by white LED lamps*, Proceedings of the 26th session of the CIE Beijing, July 2007, D1-80-83.
- [154] TASHIRO T., KIMURA-MINODA T., KOHOKO S., ISHIKAWA T., AYAMA M., *Discomfort glare evaluation to white Leds with different spatial arrangement*, Proceedings of CIE 27th Session, SunCity, South Afrika, July 2011, 583–688.
- [155] TASHIRO T., KAWANOBE S., KIMURA-MINODA T., KOHKO S., ISHIKAWA T., AYAMA M., *Discomfort glare for white LED light sources with different spatial arrangements*, *Lighting Research & Technology*, 2015, 47(3), 316–337, DOI: <https://doi.org/10.1177/1477153514532122>.
- [156] TUAYCHAROEN N., TREGENZA P.R., *View and discomfort glare from windows*, *Lighting Research & Technology*, 2007, 39(2), 189–200.
- [157] TEKELENBURG J., FISCHER D., VAN BOMMEL W.J., *Sports Lighting*, Proceedings of CIBS National Lighting Conference, 1982.
- [158] TOVÉE M.J., *An Introduction to the Visual System*, 2nd ed., Cambridge University Press, 2008.
- [159] TYUKHOVA Y.I., *Discomfort glare from small, high luminance light sources in outdoor nighttime environments* (PhD thesis), 2015, University of Nebraska – Lincoln, USA.
- [160] UCHIDA M., NAKAZATO Y., UEKI R., KITA Y., *Subjective and objective performance of laser headlamps*, Proceedings of the 11th International Symposium on Automotive Lighting ISAL'2015, 28–30.09.2015, Darmstadt.
- [161] UCHIDA T., OHNO T., *Defining the visual adaptation field for mesopic photometry: How does a high-luminance source affect peripheral adaptation*, *Lighting Research & Technology*, 2015, 47(7), 845–858.

- [162] VAN BOMMEL W., TEKELENBURG J., FISCHER D., *Glare Evaluation System for Outdoor Sports Lighting and its Consequences for the Design Practice*, Proceedings of the 20th Session of the CIE Conference on Light and Lighting, Amsterdam, 31 Aug.–8 Sep., 1983.
- [163] VAN BOMMEL W., *Road Lighting: Fundamentals, Technology and Application*, Springer 2015.
- [164] VOS J.J., *Glare today in historical perspective, towards a new CIE glare observer and new glare nomenclature*, Proceedings of the 24th Session of the CIE, 24–30.06.1999, Warsaw, Vol. 1, 38–42.
- [165] VOS J.J., *Reflections on glare*, Lighting Research & Technology, 2003, 35(2), 163–176, DOI: <https://doi.org/10.1191/1477153503li083oa>
- [166] *Wavelength to RGB*, <http://darekk.com/kalkulator/wavelength-to-rgb> (dostęp 29.07.2017).
- [167] WARD G., *High Dynamic Range Image Encodings*, <http://www.anywhere.com/gward/hdrenc/> (dostęp 29.07.2017).
- [168] WIENOLD J., CHRISTOFFERSEN J., *Evaluation methods and development of a New glare prediction model for daylight environments with the use of CCD camera*, Energy and Buildings, 2006, 38, 743–757.
- [169] WOLF S., *Entwicklung und Aufbau eines Leuchtdichte-Analysators zur Messung von Blendungskennzahlen* (PhD thesis), Publikationsreihe des LTI der TU Ilmenau nr 7, Der Andere Verlag Osnabrück, 2004, ISBN 3-89959-280-8, 2004.
- [170] WOLSKA A., *Psychofizjologia widzenia*, [w:] *Technika świetlna*, tom 1, PKOś, Warszawa, 2009, 142–192.
- [171] WOLSKA A., *Jak zmienia się oślnienie przykre przy różnym położeniu oka obserwatora?*, Bezpieczeństwo Pracy, 2012, 7, 22–26.
- [172] WOLSKA A., *Promieniowanie optyczne w środowisku pracy*, CIOP-PIB, Warszawa, 2013.
- [173] WOLSKA A., SAWICKI D., *Comparison of discomfort glare evaluation using different techniques*, Proceedings of the 12th European Lighting Conference Lux Europa 2013, Kraków, 17–19 September 2013.
- [174] WOLSKA A., SAWICKI D., *Problemy przy wyznaczaniu UGR na podstawie pomiarów fotometrem LMK*, Przegląd Elektrotechniczny, 2013, 89(12), 165–168.
- [175] WOLSKA A., *Glare as a specific factor in the working environment*, Przegląd Elektrotechniczny, 2013, 89(1a), 142–144.
- [176] WOLSKA A., SAWICKI D., *Praktyczne aspekty subiektywnej oceny oślnienia przykrego*, XXII Krajowa Konferencja Oświetleniowa, Technika Świetlna 2013, Warszawa, 21–22.11.2013, Materiały Konferencyjne, ISSN 1506-6223, 107–110.
- [177] WOLSKA A., SAWICKI D., *Glare assessment in the interior and exterior working environment – analysis of the geometric dependencies*, Proceedings of the Lumen V4 International Lighting Congress, 8–10 October, 2014, Visegrád, Hungary, 329–335.
- [178] WOLSKA A., SAWICKI D., *Evaluation of Discomfort Glare in the 50+ Elderly: Experimental Study*, International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health (IJOMEH), 2014, 27(3), 444–459, DOI: <http://dx.doi.org/10.2478/s13382-014-0257-9>.
- [179] WOLSKA A., SAWICKI D., *Ocena oślnienia na zewnętrznych stanowiskach pracy*, Bezpieczeństwo Pracy. Nauka i Praktyka, 2016, 543(12), 12–15, DOI: 10.5604/01377043.1226089.
- [180] WOLSKA A., SAWICKI D., *The luminance ratio of light sources and background as a crucial factor in glare index determination – simulation analysis*, Proceedings of 13th Selected Issues of Electrical Engineering and Electronics (WZEE 2016) (Wybrane Zagadnienia Elektrotechniki i Elektroniki), Rzeszów, 4–8.05.2016, DOI: 10.1109/WZEE.2016.7800243.
- [181] WOLSKA A., PAWLAK A., *Weryfikacja metody badań na podstawie badań pilotażowych*, Sprawozdanie z realizacji 2 etapu projektu nr IV.B.06, pt. „Opracowanie metody badań i oceny zagrożeń oślnieniem przykrym na zewnętrznych stanowiskach pracy”, realizowanego w ramach Programu Wieloletniego, pn. Poprawa Bezpieczeństwa i Warunków Pracy, II etap, okres realizacji 2011–2013, CIOP-PIB, Warszawa 2012.

- [182] WOLSKA A., PAWLAK A., *Analiza otrzymanych wyników badań*, Sprawozdanie z realizacji 3 etapu projektu nr IV.B.06, pt. „Opracowanie metody badań i oceny zagrożeń olśnieniem przykrym na zewnętrznych stanowiskach pracy”, realizowanego w ramach Programu Wieloletniego, pn. Poprawa Bezpieczeństwa i Warunków Pracy, II etap, okres realizacji 2011–2013, CIOP-PIB, Warszawa 2013.
- [183] WOLSKA A., *Analiza występowania olśnienia przykrego na wybranych zewnętrznych stanowiskach pracy na podstawie oceny subiektywnej*, Sprawozdanie z realizacji 1 etapu zadania nr 2.Z.09, pt. „Opracowanie metody badań i oceny zagrożeń olśnieniem przykrym na zewnętrznych stanowiskach pracy”, realizowanego w ramach Programu Wieloletniego, pn. Poprawa Bezpieczeństwa i Warunków Pracy, II etap, okres realizacji 2014–2016, CIOP-PIB, Warszawa 2014.
- [184] WONWOO K., YASUKO K.O., MELO B.C., *Position index for glare source in the whole Visual field*, Journal of Illuminating Engineering Institute of Japan, 2004, 88(11), 847–852.
- [185] XIA L., TU Y., LIU L., WANG Y., PENG S., KNOPP M., HEYNDERICKS I., *A study on overhead glare in Office lighting conditions*, Journal of the SID, 2011, 19/12, 888–898.
- [186] YANG Y., MA S.N., LUO M.R., LIU X.Y., *Discomfort glare caused by non-uniform white led matrices*, Proceedings of 28th CIE Session 2015, Manchester, UK, 27 June–4 July 2015, 393–399.
- [187] YANG Y., LUO M.R., MA S.N., *Assessing glare, Part 1: Comparing uniform and non-uniform LED luminaires*, Lighting Research & Technology, 2017, 49(2), 195–210. DOI: 10.1177/1477153515607396.

SELECTED ISSUES OF GLARE ASSESSMENT

Glare is a phenomenon accompanying the process of vision. It could cause discomfort or impair the vision of objects. Hitherto the glare assessment has been mainly focused on the design stage (simulation calculations) or on the subjective assessment of glare, because there was no determination method for glare indexes based on measurements. The glare assessment is a complex problem including subjective and objective aspects of evaluation. This chapter presents the characteristic of glare phenomenon related to the history of scientific research and evolution of methods for its assessment. Having that background, the Authors' methods of glare assessment have been presented, containing type of glare estimation method and subjective glare assessment method dedicated to outdoor workplaces. The selected metrological problems related to glare assessment and the method of UGR and GR determination based on measurements are presented. The error analysis of UGR and GR determination based on measurements and new unified semantic scale for glare assessment have been shown for these two indexes.

Marek LIPIŃSKI¹

CHARAKTERYSTYKA OGNIW SŁONECZNYCH

Niniejsze opracowanie poświęcone jest problemom pomiarowym ogniw słonecznych. Przedstawione są najważniejsze typy ogniw obecnie produkowanych, będących w fazie badań oraz wybrane metody ich charakteryzowania.

1. WSTĘP

Rozwój cywilizacji doprowadził do stanu, kiedy człowiek wpływa na globalny stan Ziemi, zasoby naturalne, zanieczyszczenie środowiska i zmiany klimatyczne. Jednym z najważniejszych zadań współczesnego świata jest przeciwdziałanie destrukcyjnemu działaniu przez realizację idei zrównoważonego rozwoju. Wykorzystanie odnawialnych źródeł energii jest obecnie jedyną drogą, która może doprowadzić do osiągnięcia tego celu. Synteza jądrowa byłaby idealnym rozwiązaniem, ale jest to, jak do tej pory, bardzo odległa perspektywa. Wśród odnawialnych źródeł energii, energia promieniowania słonecznego należy do najbardziej perspektywicznych.

Zamiana energii promieniowania słonecznego w energię elektryczną, z wykorzystaniem tzw. ogniw słonecznych, nie należy dzisiaj do fantastyki, należy ona do wkraczającej coraz to bardziej rzeczywistości. Systemy fotowoltaiczne małej i dużej mocy można coraz częściej zobaczyć nie tylko w krajach o dużym nasłonecznieniu, ale również coraz to częściej w krajach północnych mających mniej korzystne warunki słoneczne. Cena tego typu urządzeń ciągle się zmniejsza zgodnie z empirycznym prawem Swansona, według którego każde podwojenie zdolności produkcyjnych przemysłu fotowoltaicznego powoduje obniżenie ceny ogniw o 20%.

¹ Instytut Metalurgii i Inżynierii Materiałowej Polskiej Akademii Nauk, ul. Reymonta 25, 30-059 Kraków.

Ponieważ cena energii elektrycznej z elektrowni fotowoltaicznej maleje, a cena nieodnawialnych źródeł energii (ropy, węgla i gazu) wzrasta, nastąpi kiedyś zrównanie tych cen, a w dalszej perspektywie, energia ze Słońca będzie bardziej opłacalna. Opłacalność to tylko jeden aspekt wykorzystania energii słonecznej. Jeszcze ważniejszym aspektem jest znikomo mały wpływ instalacji fotowoltaicznych na środowisko naturalne, konwersja fotowoltaiczna należy bowiem do najbardziej ekologicznego sposobu wytwarzania energii elektrycznej. Pewien niewielki wpływ na środowisko może być jednak obecny w trakcie procesów wytwarzania ogniw i modułów. Również niektóre rodzaje ogniw, np. ogniwa perowskitowe, zawierają niewielką ilość ołowiu, a ogniwa z tellurku kadmu zawierają toksyczny kadm. Należy jednak stwierdzić, że ogniwa perowskitowe są obecnie jeszcze w fazie badań laboratoryjnych i jednym z ważniejszych problemów jest zastąpienie Pb przez inny pierwiastek, który byłby akceptowany przez środowisko. Natomiast ogniwa z tellurkiem kadmu należą do ogniw stosowanych dzisiaj w bardzo niewielkich ilościach i nie wydaje się, by mogły kiedykolwiek stanowić większy udział w produkcji energii elektrycznej. Cała dzisiejsza fotowoltaika oparta jest na krzemie, który ma dużo zalet w porównaniu z innymi materiałami: jest nietoksyczny, występuje obficie na Ziemi i uzyskuje wysokie sprawności. Będzie on prawdopodobnie przez wiele lat najważniejszym materiałem, choć niektórzy uważają, że w dalszej perspektywie materiały o strukturze perowskitów będą odgrywać wiodącą rolę w przyszłej energetyce fotowoltaicznej ze względu na mniejszy koszt procesów niskotemperaturowych i potencjalnie wysokie sprawności.

Rozwój technologii ogniw słonecznych związany jest z rozwojem nauk materiałowych, fizyki przyrządów półprzewodnikowych oraz z rozwojem metod pomiarowych. Metody te stosuje się zarówno do scharakteryzowania gotowych przyrządów w postaci ogniw i modułów fotowoltaicznych, jak i po każdym etapie ich produkcji, a także do scharakteryzowania materiałów używanych do wytwarzania ogniw słonecznych. Najważniejszym pomiarem stosowanym do charakterystyki ogniw i modułów fotowoltaicznych jest pomiar charakterystyk prądowo-napięciowych I-V, uzyskuje wszystkie parametry elektryczne ogniwa, a przede wszystkim jego maksymalną moc i sprawność konwersji fotowoltaicznej. Żeby można było w sposób jednoznaczny charakteryzować ogniwa i moduły, pomiary muszą być przeprowadzane dla ściśle zdefiniowanych warunków, określonych przez rozkład widmowy promieniowania słonecznego, natężenie promieniowania i temperaturę ogniwa. Dlatego też na początku pracy przedstawione są standardowe warunki tzw. STC (ang. *Standard Test Condition*), dla których przeprowadza się pomiary parametrów elektrycznych ogniwa, a następnie opisane metody charakteryzowania ogniw oparte na pomiarach charakterystyk I-V. Metody te uzyskują pewne uśrednione parametry diody takie, jak: rezystancja szeregową, równoległą, współczynnik jakości diody, ciemne prądy nasycenia oparte na modelach diodowych. W rzeczywistym ogniwie wartości tych parametrów zmieniają się od punktu do punktu i bardziej odpowiednimi modelami opisującymi charakterystyki I-V byłyby modele dwu- lub nawet trzywymiarowe. Bardziej realny

opis parametrów można uzyskać na podstawie obrazowania luminescencyjnego. Metoda ta umożliwia uzyskiwanie rozkładu parametrów na powierzchni ogniwa takich, jak rezystancja szeregową, czas życia nośników, prądy ciemne nasycenia i rezystancje równoległe. Znajduje ona coraz to większe wykorzystanie zarówno w laboratoriach badawczych, jak i w masowej produkcji ogniw i modułów fotowoltaicznych. Jest ona najczęściej stosowana do uzyskiwania jakościowej charakterystyki, szybkiej diagnostyki ogniw i modułów, np. do wykrywania mikropęknięć ogniw, przerwanych ścieżek kontaktów.

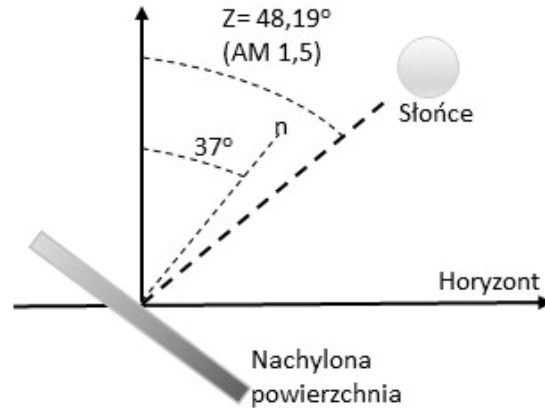
W pracy opisano wymienione metody charakteryzowania ogniw słonecznych. Wykorzystano krzemowe komercyjne ogniwa oraz ogniwa krzemowe i perowskitowe utworzone w Laboratorium Fotowoltaicznym IMIM PAN w Kozach.

2. WIDMO WZORCOWE ZIEMSKIEGO PROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO

Przemysł fotowoltaiczny we współpracy z Amerykańskim Stowarzyszeniem Badań i Materiałów, międzynarodową organizacją opracowującą normy (ang. *American Society for Testing and Materials* – ASTM) i z rządowymi laboratoriami badawczo-rozwojowymi US opracował dwa standardy widma ziemskiego promieniowania słonecznego. Widma te, to: standardowe widmo promieniowania bezpośredniego (*direct normal*) i standardowe widmo promieniowania całkowitego (*global*). Widmo promieniowania całkowitego jest widmem promieniowania słonecznego padającego na płaszczyznę nachyloną, pochodzącego z półsfery (kąąt bryłowy 2π sr). Widmo promieniowania bezpośredniego prostopadłego jest składową całkowitego widma promieniowania. Obecnie aktualne standardowe widma są przedstawione w dokumencie ASTM G-173-03. Widma te nie są widmami uzyskanymi na drodze pomiarowej, ale są generowane numerycznie z użyciem programu SMARTS v.2.9.2 opracowanego przez Gueymarda [1–4].

Widma ASTM G-173 są widmami promieniowania ziemskiego padającego na powierzchnię o określonej orientacji (rys. 1), dla określonych warunków atmosferycznych. Przedstawiają one rozkłady natężenia promieniowania (w jednostkach $\text{Wm}^{-2}\text{nm}^{-1}$) w funkcji długości fali. Zostały obliczone dla promieniowania słonecznego po założeniu, że kąt zenitalny Słońca wynosi $48,19^\circ$ (wysokość Słońca $41,81^\circ$ ponad horyzontem), co odpowiada 1,5-krotnemu przejściu promieniowania słonecznego przez atmosferę ziemską i stąd nazwa AM 1,5 (AM – *Air Mass*). Kąt $48,19^\circ$ został wybrany ze względu na to, że jest to w przybliżeniu średnia szerokość geograficzna dla USA. Powierzchnia, na którą pada promieniowanie jest zdefiniowana jako powierzchnia nachylona pod kątem 37° do płaszczyzny horyzontu w kierunku do Słońca.

Widma te są obliczane dla pewnych specyficznych warunków atmosferycznych tzw. standardowej atmosfery USA opracowanej w 1976 r. (1976 *U.S. Standard Atmosphere*), dla której określony jest rozkład temperatury, gęstości powietrza, gęstości zanieczyszczeń zawartości wody, ozonu i po założeniu określonego rozkładu spektralnego odbicia światła od powierzchni Ziemi (albedo) [6].



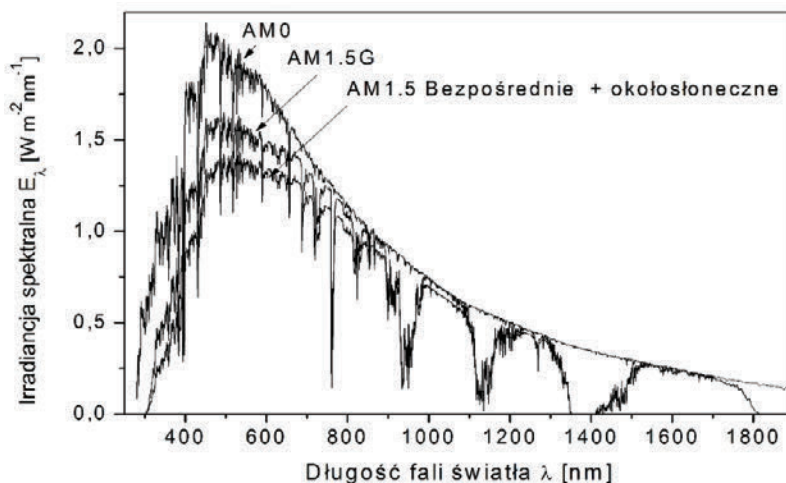
Rys. 1. Geometria wzajemnego położenia Słońca i nachylonej płaszczyzny modułu *PV*, wykorzystana do symulacji standardowego rozkładu promieniowania słonecznego AM1,5. Azymut Słońca wynosi 180°, płaszczyzna jest nachylona pod kątem 37° do płaszczyzny horyzontu w kierunku równika. Prostopadła do tej płaszczyzny, oznaczona przez *n*, tworzy kąt 37° z kierunkiem zenitalnym [5]

Fig. 1. The geometry of the relative positions of the sun and the inclined plane of the *PV* module, used to simulate a standard distribution of solar radiation AM1,5.

The azimuth of the sun is 180° plane is inclined at an angle of 37° to the plane of the horizon towards the equator. Perpendicular to the plane, denoted by *n*, forms an angle of 37° to the zenithal direction [5]

Do generowania standardowych widm słonecznych używa się widma słonecznego pozaziemskiego, tzw. AM0 (*Air Mass Zero*). Widmo AM0 używane do generacji ziemskich widm standardowych nie jest standardowym widmem AM0, istnieje niewielka różnica pomiędzy tymi widmami zarówno w zakresie długości fal, jak i spektralnej rozdzielczości. Wykresy trzech rozkładów widmowych przedstawione są na rys. 2. Standardem widma AM0 jest ASTM E-490-(2014). Energia słoneczna odpowiadająca temu promieniowaniu (stała słoneczna) wynosi 1366,1 Wm⁻². Widmo to (nieprzedstawione na rys. 2) jest dokładniejsze w zakresie widzialnym i obejmuje szerszy zakres promieniowania 199,5–1000 μm.

Widmo AM1,5G na rysunku 2 scałkowane po całym zakresie 280–4000 nm, daje gęstość energii padającego promieniowania 1000,37 W/m². Dla standardowych warunków pomiarowych widmo to jest normalizowane do wartości 1000 W/m².



Rys. 2. Rozkłady widmowe AM0, AM1,5 bezpośrednie (+ okołosłoneczne) i AM1.5G całkowite (ASTM G173-03 i IEC 60904-3: 2008).

Widma obliczone z użyciem programu SMARTS v. 2.9.2 [7]

Fig. 2. AM0 extraterrestrial spectrum and AM1,5 direct normal (+ circumsolar) and global AM1.5G (ASTM G173-03 and IEC 60904-3: 2008).

The references spectra calculated by SMARTS v 2.9.2 program [7]

3. OGNIWO FOTOWOLTAICZNE

3.1. WSTĘP

Ogniwo fotowoltaiczne jest konwerterem energii promieniowania elektromagnetycznego, np. słonecznego w energię elektryczną. Oparte jest na efekcie fotowoltaicznym, który po raz pierwszy został zademonstrowany w 1839 r. przez Bequerela, kiedy oświetlono elektrodę Pt pokrytą warstwą AgCl lub AgBr zanurzoną w roztworze kwasu. Pierwsze ogniwa wytworzone przez Fritsa w 1883 r. oparte są na cienkowarstwowych warstwach Se. Ogniwa fotowoltaiczne aż do 1940 r. były to struktury głównie typu metal-półprzewodnik z wykorzystaniem takich materiałów, jak Se, Cu₂O i Tl₂S. Pierwsze ogniwo krzemowe zostało wytworzone w 1941 r. z przez Russela Ohla w Bell Laboratorium z krzemu, w którym złącza *n-p* powstawały w trakcie krystalizacji w sposób naturalny w wyniku segregacji domieszki w czasie krystalizacji. Rozwój technologii krystalizacji krzemu, według tej metody krystalizacji, odkrytej przez Czochralskiego w 1916 r. oraz technologii formowania złącza półprzewodnikowego metodą dyfuzji, zaowocowało pierwszym nowoczesnym ogniwem krzemowym opublikowanym przez Pearsona, Fullera i Chapina z Bell Laboratorium w 1954 r. Ogniwo to

miało sprawność około 6%, czyli około 15 razy większą niż wszystkie wcześniej wytwarzane.

Początkowo ogniwa wykorzystywano do celów kosmicznych. Dopiero w latach 70. XX w. rozpoczął się rozwój ogniw fotowoltaicznych do zastosowania na Ziemi, jako alternatywne źródło energii elektrycznej mogącej zastąpić w przyszłości konwencjonalne źródła energii. Większość ogniw produkowanych do dzisiaj opartych jest na krzemowym złączu *p-n*. W ciągu ostatnich około 60 lat nastąpił olbrzymi postęp w technologii ogniw słonecznych. Rozwijano je od samego początku w dwóch kierunkach: wysokosprawnych ogniw opartych głównie na krzemie monokrystalicznym wysokiej jakości i tanich ogniwach o mniejszej sprawności opartych głównie na krzemie polikrystalicznym (multikrystalicznym). Wysokosprawne ogniwa oparte na krzemie monokrystalicznym osiągają już sprawności ok. 25%, a na krzemie multikrystalicznym ok. 20%. Równocześnie rozwijane są innego rodzaju ogniwa, głównie cienkowarstwowe, które mogłyby zastąpić krzem. Badania te prowadzone są równolegle dla wielu odmiennych technologii i różnych materiałów, spośród których można wymienić: ogniwa cienkowarstwowe oparte na materiałach, takich jak krzem amorficzny (a-Si), związki CuInSe (CIS), CdTe, CZTS (tzw. kesteryty), ogniwa organiczne, barwnikowe (DSSC) i w ostatnich latach ogniwa perowskitowe.

Wśród stosowanych materiałów krzem krystaliczny jest najczęściej używany do produkcji ogniw. Ponad 90% wyprodukowanych ogniw stanowią ogniwa z krzemu monokrystalicznego (sc-Si) lub multikrystalicznego (mc-Si). Multikrystaliczny krzem jest tańszym materiałem od krzemu monokrystalicznego, ponieważ krystalizuje się go metodą odlewania, która jest mniej energochłonna niż metoda Czochralskiego, stosowana do wytwarzania krzemu monokrystalicznego. Ogniwa z krzemu monokrystalicznego osiągają za to wyższe sprawności niż ogniwa z krzemu multikrystalicznego, co w efekcie sprawia, że obecnie stosunek ceny modułu do jego mocy są zbliżone dla tych dwu materiałów. Biorąc po uwagę, że jednak mniejsze sprawności ogniw generują większe dodatkowe koszty związane np. z większą powierzchnią (tzw. BOS – *Balanse of System*), coraz większe zainteresowanie jest modułami *PV* o najwyższych mocach, ale i droższych w porównaniu z modułami mniejszej mocy. Do tego rodzaju modułów należą moduły zbudowane z ogniw wysokosprawnych typu PERC i HIT.

Ogniwa z krzemu krystalicznego należące do tzw. pierwszej generacji mogą być w dalszej przyszłości zastąpione przez ogniwa cienkowarstwowe, zaliczane do ogniw drugiej generacji, które ze względu na mniejsze zużycie materiału bazowego mogą ułatwić dalsze zmniejszenie stosunku cena/moc. Jednak muszą one osiągnąć odpowiednio wysokie sprawności, by mogły być konkurencyjne dla energii konwencjonalnej. Dlatego też większy udział fotowoltaiki słonecznej w bilansie energetycznym wymaga poszukiwania nowych rozwiązań w celu uzyskania znacznego wzrostu sprawności ogniw.

Fotowoltaika ulega ciągłemu rozwojowi. W ciągu ostatnich 20 lat było kilka przełomowych dokonań w rozwoju wysokosprawnych ogniw krzemowych. Uzyskano

poprawę sprawności dzięki poprawie właściwości elektrycznych poprzez pasywację powierzchni ogniw, kontrolę poziomu domieszkowania, lokalne domieszkowanie, a także poprawę właściwości optycznych, wprowadzając teksturę powierzchni zmniejszającą odbicie światła od powierzchni i przez pułapkowanie światła (ang. *light trapping*). Ulepszenia te były wprowadzane w ogniwach typu MINP (ang. *metal-insulator-*np* junction*), w ogniwach z kontaktami punktowymi na tylnej powierzchni (ang. *back side point contact*) i w ogniwach PERL (ang. *Passivated Emitter with Rear Locally Diffused Cell*). Ogniwo o strukturze PERL opracowane przez grupę Greena z Uniwersytetu Południowej Walii (UNSW) w Australii uzyskało rekordową sprawność w 1999 r. wynoszącą 24,7% dla widma AM1,5G [8]. Sprawność tego ogniwa dla nowego standardu widma promieniowania słonecznego AM1.5G [9] podana w 2009 r. przez Greena wynosi 25%. Ogniwo to, o małej powierzchni tylko 4 cm², zostało wykonane na płycie grubości 450 μm z krzemu FZ o czystości elektronicznej. Technologię tę udało się zaadaptować do masowej produkcji ogniw typu PERC (ang. *Passivated Emitter Rear Cell*) mających sprawności powyżej 22% na dużych powierzchniach, 243 cm².

Innym znaczącym osiągnięciem było opracowanie ogniwa HIT (ang. *Heterojunction with Intrinsic Thin-Layer*) [10]. Ogniwa te wywodzą się z ogniw wcześniejszej generacji ze strukturą a-Si/c-Si, w których warstwa krzemu amorficznego tworzy z krzemem krystalicznym heterozłącze. W strukturze ogniwa HIT, opracowanej w Sanyo Electric Co Ltd., bardzo cienka warstwa niedomieszkowanego krzemu amorficznego a-Si została umieszczona dodatkowo pomiędzy krzemem krystalicznym typu *n* i warstwą krzemu amorficznego a-Si typu *p*. Głównymi zaletami tego typu ogniw jest to, że wytwarza się je w niskich temperaturach (ok. 200 °C) bez potrzeby wytwarzania tradycyjnego złącza *n-p* w wysokiej temperaturze, co upraszcza proces technologiczny, obniża jego koszt, a uzyskiwane sprawności są duże dzięki bardzo dobrym właściwościom pasywującym przez warstwę a-Si. Ogniwa typu HIT o strukturze dwustronnej są obecnie wytwarzane w masowej produkcji, a ich sprawności przekraczają 20%. Rekordowa sprawność tego typu ogniw 25,6% ($V_{oc} = 740$ mV, $J_{sc} = 41,8$ mA/cm², $FF = 82,7\%$) dla powierzchni 143,7 cm² uzyskana została przez Panasonic [11]. Ogniwa te w produkcji przekraczają sprawność 22%. Technologia ta znana też pod nazwą HJT (ang. *Heterojunction Technology*) dotyczy ogniw typu HIT produkowanych przez Meyer Burger.

W związku z tak wysokimi uzyskiwanymi sprawnościami powstaje pytanie czy istnieje możliwość dalszego podwyższenia sprawności i w jakim stopniu. Jeśli rozpatruje się jednozłączowe ogniwa fotowoltaiczne, szerokość przerwy energetycznej półprzewodnika E_g jest czynnikiem ograniczającym maksymalną wartość sprawności konwersji, którą można uzyskać w określonych mechanizmach rekombinacji nośników. Dla jej optymalnej wartości wynoszącej $E_g = 1,3$ eV i założeniu, że ogniwo jest ciałem doskonale czarnym, zakładając jedynie mechanizm rekombinacji promienistej, podany przez Shockleya i Queissera [12] limit sprawności konwersji wynosi 32,9%

dla standardowego widma całkowitego promieniowania słonecznego (sumy bezpośredniego i rozproszonego) typu AM1,5G. Dla krzemu limit ten wynosi 29,8%, maksymalne wartości wytwarzanych ogniw są już więc bliskie tej wartości [13]. Limit Shockleya i Queissera nie jest limitem termodynamicznym konwersji promieniowania słonecznego w elektryczną. Jest to limit dla ogniw jednozłączowych po założeniu, że jeden foton generuje tylko jedną parę elektron-dziura. Absolutny limit dla konwersji fotowoltaicznej jest limitem Carnota, który wynosi 95% dla konwersji energii cieplnej dostarczanej do fotosfery słonecznej o temperaturze 600 K w energię elektryczną na powierzchni Ziemi o temperaturze 300 K. Bardziej realny limit Landsberga wynosi 93,3% dla promieniowania bezpośredniego i 73,7% dla promieniowania całkowitego [14]. Wartości tych limitów są wyzwaniem dla naukowców zajmujących się ogniwami trzeciej generacji, zaproponowanych przez M. Greena [14]. Do koncepcji ogniw trzeciej generacji należą między innymi ogniwa tandemowe, czyli wielozłączowe, zbudowane z kropek kwantowych, ogniwa tzw. *hot carrier*, ogniwa z dodatkowymi energetycznymi pasmami zabronionymi IBSC i ogniwa z „dolnym” i „górnym” konwerterem [14–16]. Spośród tych koncepcji tylko koncepcja ogniw wielozłączowych, opartych na materiałach z grupy III-V, doczekała się realizacji w postaci ogniw o sprawnościach wyższych niż zwykle ogniwa jednozłączowe. Rekordową sprawność 45,7% uzyskano w Laboratorium NREL dla ogniwa 4-złączowego GaInP/GaAs/ GaInAs/GaInAs dla skoncentrowanego światła 234 razy. Jeszcze wyższą sprawność 46% uzyskano dla ogniwa składającego się z dwóch połączonych (mechanicznie) ogniw GaInP/GaAs i GaInAsP/GaInAs (Soitec/CEA/FhG-ISE) dla światła skoncentrowanego 508 razy [11].

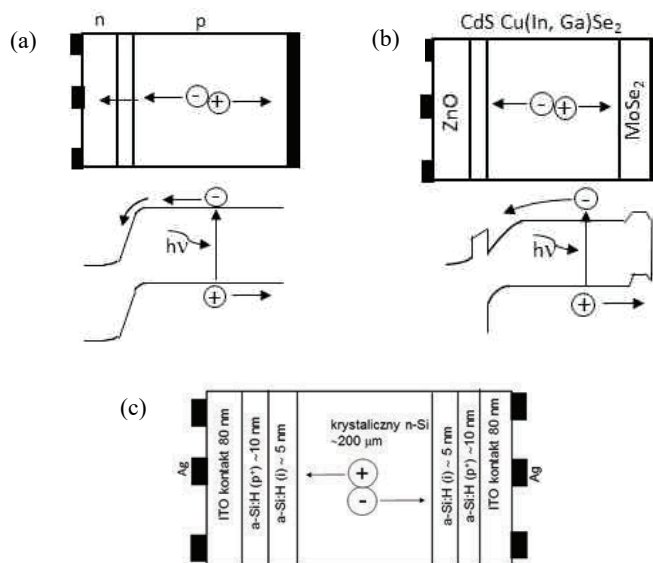
3.2. ZASADA DZIAŁANIA

Działanie ogniwa fotowoltaicznego oparte jest na czterech podstawowych zjawiskach [17,18]:

1. Absorbpcja światła powodująca przejście materiału ze stanu podstawowego do stanu wzbudzonego.
2. Konwersja wzbudzonego stanu w parę swobodnych nośników elektron-dziura.
3. Transport nośników, ładunków ujemnych w kierunku jednej elektrody tzw. katody i ładunków dodatnich w kierunku przeciwnym do drugiej elektrody, czyli anody.
4. Transport generowanych światłem elektronów w obwodzie zewnętrznym, gdzie wykonują użyteczną pracę i ich rekombinacja na anodzie doprowadzająca absorber do stanu podstawowego.

Absorberem jest zazwyczaj półprzewodnik, w którym następuje w wyniku absorpcji światła generacja elektronów z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa. Istnienie przerwy energetycznej opóźnia ich rekombinację i umożliwia ich rozdzielanie. Żeby nośniki mogły być rozdzielone i dostać się do elektrod ogniwa muszą być

spełnione odpowiednie warunki. Najczęściej tym czynnikiem rozdzielającym nośniki jest wewnętrzne wbudowane pole elektryczne, jakie powstaje w obszarze złącza dwóch przewodników o różnym typie przewodnictwa, czyli złącza $n-p$. W ogólnym przypadku materiałem absorbującym nie musi być półprzewodnik. Przykładem są ogniwa barwnikowe oznaczane przez DSSC, w których absorpcja światła i generacja nośników następuje w cząsteczkach barwnika przyłączonych do tlenku tytanu będącego półprzewodnikiem typu n o dużej przerwie energetycznej. Wzbudzone elektrony przeskakują do pasma przewodnictwa w TiO_2 . W ogniwach tych TiO_2 jest w postaci porowatej dla zwiększenia powierzchni absorbującej światło przez cząsteczki barwnika. W miejscu brakujących elektronów w cząsteczce barwnika następuje szybko ich uzupełnienie przez elektrony przepływające przez ośrodek ciekłego elektrolitu. Zasada działania ogniwa nie opiera się więc na złączu $n-p$, warunkiem powstania efektu fotowoltaicznego jest złamanie symetrii w strukturze ośrodka absorbującego,



Rys. 3. (a) Struktura krystalicznego krzemowego ogniwa słonecznego; zbudowana jest z płytki krystalicznej krzemowej typu p , w której wytworzono obszar typu n .

W wyniku absorpcji światła generowane są pary nośników elektron-dziura.

Rolą złącza $n-p$ jest rozdzielenie nośników powodujące powstanie napięcia między elektrodą przednią i elektrodą tylną, (b) Struktura ogniwa typu CIGS [19],

(c) Struktura dwustronnego ogniwa HIT [20]

Fig. 3. (a) The structure of the crystalline silicon solar cell. It is formed by p -type crystal silicon wafer, which contains n -type region. As a result of light absorption, the pairs electron-hole carriers are generated. The role of the $n-p$ junction is separation of the carriers resulting in a voltage between the front electrode and the rear electrode, (b) Structure of the CIGS solar cell [19], (c) Structure of the HIT bifacial solar cell [20]

prowadząca do zmiany koncentracji nośników mniejszościowych w objętości materiału [17, 18]. Na rysunku 3 przedstawione są schematycznie wybrane struktury ogniwa krzemowego ze złączem *n-p* (a), ogniwa CIGS z heterozłączem (b) [19] i ogniwa HIT (c) [20].

3.3. MAKSYMALNE SPRAWNOŚCI W ZALEŻNOŚCI OD PRZERWY ENERGETYCZNEJ I TEMPERATURY

Limity termodynamiczne dla ogniw jednozłączowych obliczone zostały przez Shockleya i Queisera [12]. Na podstawie ich metody tzw. *detailed balance principle* DUPRÉ i wsp. obliczyli limity sprawności ogniw jednozłączowych w zależności od przerwy energetycznej dla różnych temperatur [21]. Limity te określone są po założeniu, że ogniwo jest ciałem doskonale czarnym oraz że prędkości absorpcji n_{abs} , i emisji światła n_{emit} określone są przez uogólnione równanie Plancka [22]:

$$n_{\text{abs}}(E_g, T_s, \Omega_{\text{abs}}) = \frac{2\Omega_{\text{abs}}}{c^2} \int_{E_g}^{\infty} \frac{E^2}{\exp\left(\frac{E}{kT_s} - 1\right)} d(E) \quad (1)$$

$$n_{\text{emit}}(E_g, T_c, \Omega_{\text{emit}}) = \frac{2\Omega_{\text{emit}}}{c^2 h^2} \int_{E_g}^{\infty} \frac{E^2}{\exp\left(\frac{E - qV}{kT_c} - 1\right)} d(E) \quad (2)$$

gdzie c i h są prędkością światła w próżni i stałą Plancka, a q , k , T_c , T_s , Ω_{emit} i Ω_{abs} są ładunkiem elektronu, stałą Boltzmana, temperaturą ogniwa, temperaturą Słońca oraz kątami bryłowymi emisji i absorpcji światła, a V jest napięciem pomiędzy elektrodami ogniwa, odpowiednio. Iloczyn ładunku i napięcia qV jest energią Gibbsa (entalpią swobodną) fotogenerowanych par nośników, czyli chemicznym potencjałem pary elektron-dziura [23]. Podstawowym założeniem jest, że cała rekombinacja nośników jest rekombinacją promienistą, której prędkość równa jest prędkości emisji promieniowania przez ogniwo.

Dupré i wsp. [21] rozpatrywali wpływ temperatury na parametry ogniwa oparte na wynikach uzyskanych przez Hirsta i Ekinsa–Daukesa [23], którzy według metody *detailed balance principle* [12] zbadali wewnętrzne procesy strat mocy ogniwa prowadzące do fundamentalnych limitów jego sprawności.

Żeby określić zależność strat mocy od temperatury dla różnych półprzewodników, konieczne jest określenie napięcia V_{max} i prądu I_{max} w punkcie maksymalnej mocy. Relacja Hirsta i Ekinsa–Daukesa pomiędzy przerwą energetyczną E_g i napięciem w punkcie maksymalnej mocy V_{max} [23] jest następująca:

$$qV_{\max} \approx E_g \left(1 - \frac{T_c}{T_s} \right) - kT_c \ln \left(\frac{\Omega_{\text{emit}}}{\Omega_{\text{abs}}} \right) \quad (3)$$

Można zauważyć, że w równaniu tym występują dwa czynniki powodujące obniżenie napięcia V_{\max} , czynnik Carnota oraz czynnik wynikający z różnicy kąta bryłowego emisji i absorpcji światła. Natomiast gęstość prądu w punkcie maksymalnej mocy można policzyć ze wzoru [21]:

$$J_{\max} = q(n_{\text{abs}} - n_{\text{emit}}(V_{\max})) \quad (4)$$

Stosunek $\frac{\Omega_{\text{emit}}}{\Omega_{\text{abs}}} = 1$ dla maksymalnej koncentracji promieniowania słonecznego f_{\max} :

$$f_{\max} = \left(\frac{d_{zs}}{r_s} \right)^2 = 46198 \quad (5)$$

gdzie d_{zs} odległość z Ziemi do Słońca, a r_s promień Słońca.

Ze wzoru (3) wynika, że dla maksymalnej koncentracji światła maksymalne napięcie V_{\max} określone jest przez równanie:

$$qV_{\max} \approx E_g \left(1 - \frac{T_c}{T_s} \right) \approx 0,95 E_g \quad (6)$$

Kiedy ogniwo jest oświetlone światłem bezpośrednim pochodzącym z kąta bryłowego $\Omega_{\text{abs}} = 6 \times 10^{-5}$ sr i emitującym promieniowanie w kąt bryłowy $\Omega_{\text{emit}} = 4\pi$ sr:

$$qV_{\max} = 0,95 \times E_g - 0,31 \text{ eV} \quad (7)$$

gdzie $kT_c = 0,02586$ eV dla $T_c = 300$ K i $T_s = 6000$ K. Dla typowego ogniwa słonecznego z przerwą energetyczną 1–1,5 eV, strata napięcia V_{\max} wynosi prawie 30% w wyniku niedopasowania kątów emisji i absorpcji światła. Na rysunku 4 przedstawiono wykresy maksymalnych teoretycznych sprawności w funkcji szerokości przerwy energetycznej dla temperatur z zakresu 5–65 °C [21]. Na rysunku zaznaczone są również sprawności dla kilku półprzewodników oraz zmiana ich przerwy energetycznej wraz z temperaturą w postaci odcinków.

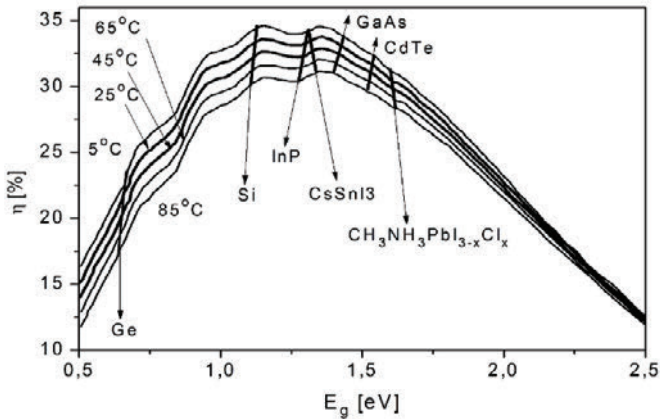
Dla półprzewodników Ge, Si, InP, CdTe przerwa energetyczna maleje podobnie jak dla większości półprzewodników, zgodnie z aproksymowaną zależnością Varshni [24]:

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (8)$$

gdzie α i β są stałymi materiałowymi, a $E_g(0)$ jest szerokością przerwy energetycznej w temperaturze 0 K.

Nie wszystkie półprzewodniki tak się jednak zachowują. Przykładem są perowskity CsSnI_3 i $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$, których przerwa energetyczna wzrasta wraz z temperaturą [25, 26]. Współczynnik temperaturowy dla szerokości przerwy energetycznej dla CsSnI_3 wynosi 0,35 meV/K i ok. 0,30 meV/K dla $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$. W podobny sposób zachowują się półprzewodniki chalcogenkowe, jak np. PbS, Se/Te i CuCl, Br/I.

Zmiana przerwy energetycznej wraz z temperaturą jest dodatkowym czynnikiem, mającym wpływ na maksymalną teoretyczną wartość sprawności. Z rysunku 4 wynika, że w przypadku niektórych materiałów, np. InP, zmiana przerwy energetycznej powoduje większą redukcję sprawności niż dla innych, np. dla CsSnI_3 .



Rys. 4. Maksymalne teoretyczne sprawności kilku półprzewodników dla różnych temperatur na podstawie artykułu [21]

Fig. 4. Maximal theoretical efficiencies of several semiconductors at different temperatures based on the publication [21]

4. CHARAKTERYSTYKA I-V, OBWÓD ZASTĘPCZY

Wszystkie najważniejsze parametry ogniwa słonecznego określone są z charakterystyki prądowo-napięciowej zmierzonej w określonych warunkach. Zwykle pomiar przeprowadza się w warunkach standardowych STC. Warunki te są zdefiniowane następująco: temperatura ogniwa 25 °C, widmo słoneczne AM1,5G znormalizowane do 1000 W/m². W praktyce, warunki te nigdy nie są spełnione. Pomiar dokonywany jest zazwyczaj z użyciem tzw. symulatorów promieniowania słonecznego, których widmo odbiega od widma standardowego w różnym stopniu, w zależności od klasy symulatora. Podobnie temperatura mierzonego ogniwa może różnić się od temperatury 25 °C. Dlatego też ważnym zagadnieniem jest zbadanie niedopasowania spektralnego

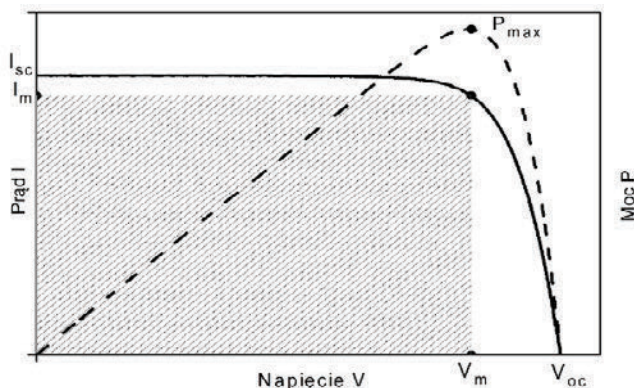
widma, znajomość współczynników temperaturowych ogniwa w celu uwzględnienia poprawek i określenia niepewności pomiarowej parametrów elektrycznych dla warunków STC.

Na rysunku 5 przedstawiono przykładową charakterystykę jasną I-V ogniwa. Można z niej odczytać z przecięcia krzywej z osiami prąd zwarciaowy I_{sc} i napięcie obwodu otwartego V_{oc} . Na rysunku przedstawiono również moc ogniwa ($I \times V$) w funkcji napięcia. Dla określonego punktu charakterystyki (V_m , I_m) moc przyjmuje maksymalną wartość $P_{max} = I_m \times V_m$. Wartość ta równa jest polu powierzchni zakreślonego prostokąta pod charakterystyką I-V. Na podstawie charakterystyki I-V oświetlonego ogniwa określa się podstawowe parametry ogniwa:

- I_{sc} – natężenie prądu zwarciaowego,
- V_{oc} – napięcie otwartego obwodu,
- P_{max} – maksymalna moc,
- I_m – natężenie prądu w punkcie maksymalnej mocy,
- V_m – napięcie w punkcie maksymalnej mocy,
- FF – współczynnik wypełnienia,
- η – sprawność konwersji energii.

Gdzie parametr FF jest zdefiniowany jako:

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} \quad (9)$$



Rys. 5. Charakterystyka prądowo-napięciowa oraz moc ogniwa słonecznego
Fig. 5. Current-voltage characteristic and the power of the solar cell

Sprawność konwersji ogniwa definiuje się jako stosunek maksymalnej mocy elektrycznej ogniwa do mocy padającego promieniowania i podaje w procentach:

$$\eta = \frac{I_m V_m}{AP_{in}} \times 100\% = \frac{FF J_{sc} V_{oc}}{P_{in}} \times 100\% \quad (10)$$

gdzie P_{in} jest natężeniem promieniowania słonecznego padającego na ogniwo (1000 W/m² dla warunków STC), A powierzchnią ogniwa, J_{sc} gęstością prądu zwarciovego ($J_{sc} = I_{sc}/A$).

Idealne ogniwo słoneczne ze złączem n - p może być przedstawione jako źródło prądowe połączone równolegle z diodą prostującą, której charakterystykę prądowo-napięciową (I-V) opisuje równanie Shockleya [27]:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V}{V_t}\right) - 1 \right] \quad (11)$$

gdzie: I_{ph} – natężenie fotoprądu, I_0 – natężenie ciemnego prądu nasycenia, a $V_t = kT/q$ tzw. napięcie termiczne, gdzie k – stała Boltzmana, T – temperatura w skali bezwzględnej, q – ładunek elementarny ($V_t \sim 25,69$ mV dla $T = 298,15$ K (25 °C)).

Dla idealnego ogniwa napięcie obwodu otwartego V_{oc} może być wyrażone przez:

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_{sc} + I_0}{I_0} \approx \frac{kT}{q} \ln \frac{I_{sc}}{I_0} \quad (12)$$

natomiast idealny współczynnik wypełnienia FF może być aproksymowany z dokładnością około czterech znaczących cyfr dla $v_{oc} > 10$ przez równanie (13):

$$FF = [v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0.72)] / (v_{oc} + 1) \quad (13)$$

gdzie $v_{oc} = V_{oc}/(nkT/q)$ jest znormalizowanym napięciem, a $kT/q = 0,02586$ V dla 300 K.

Z równania (13) wynika, że dla napięcia $V_{oc} = 0,7$ V, $FF = 0,85$. Zakładając nawet nierealnie wysokie napięcie równe przerwie energetycznej dla krzemu $E_g = 1,12$ eV, $FF = 0,89$ dla temperatury pokojowej $T = 300$ K.

Charakterystykę idealnego ogniwa ze złączem n - p można uzyskać z zasady superpozycji przez przesunięcie charakterystyki I-V idealnej diody prostującej wzdłuż osi prądowej o wartość I_{ph} . Charakterystyki rzeczywistych ogniw różnią się jednak od charakterystyki idealnego ogniwa. Charakterystykę ogniwa najczęściej opisuje się równaniem (14), w którym występuje rezystancja szeregową R_s i rezystancja równoległa R_{sh} oraz współczynnik jakości diody n :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{nV_t}\right) - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (14)$$

Równanie (14) można zapisać w postaci, w której zamiast natężeń prądów występują gęstości prądów (15):

$$J = J_{ph} - J_0 \left[\exp\left(\frac{V + J \cdot r_s}{nV_t}\right) - 1 \right] - \frac{V + J \cdot r_s}{r_{sh}} \quad (15)$$

gdzie $r_s = R_s \times A$ i $r_{sh} = R_{sh} \times A$ są znormalizowanymi rezystancją szeregową i równoległą ogniwa wyrażone w jednostkach $\Omega \times \text{cm}^2$. Zaletą wprowadzenia tych wielkości jest to, że nie zależą one od wielkości pola powierzchni ogniwa.

Do opisu charakterystyk I-V stosuje się zwykle dwudiodowy model, określony przez równanie:

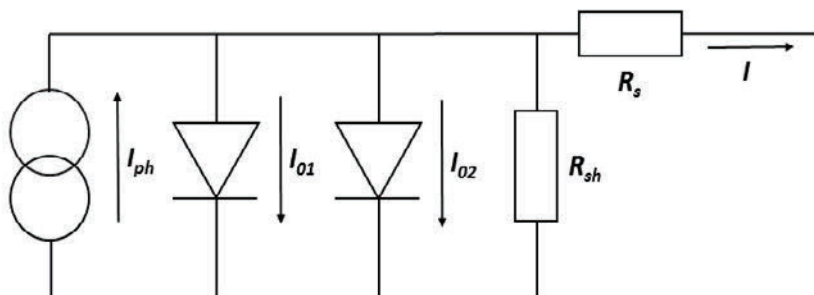
$$I = I_{ph} - I_{01} \left[\exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{n_1 V_t}\right) - 1 \right] - I_{02} \left[\exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{n_2 V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (16)$$

gdzie: n_1 i n_2 współczynniki jakości diod, I_{01} , I_{02} – ciemne prądy nasycenia diod.

Równanie (16) można zapisać w postaci, w której zamiast natężeń prądów występują gęstości prądów oraz znormalizowane rezystancje szeregową i równoległą:

$$J = J_{ph} - J_{01} \left[\exp\left(\frac{V + J \cdot r_s}{n_1 V_t}\right) - 1 \right] - J_{02} \left[\exp\left(\frac{V + J \cdot r_s}{n_2 V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V + J \cdot r_s}{r_{sh}} \quad (17)$$

Na rysunku 6 przedstawiony jest schemat zastępczy obwodu elektrycznego ogniwa słonecznego.



Rys. 6. Schemat zastępczy ogniwa słonecznego
Fig. 6. The equivalent circuit of a solar cell

Krzemowe ogniwo opisuje się zwykle modelem jednodiodowym (model SEM – *Single Exponential*) lub modelem dwudiodowym, w którym $n_1 = 1$ i $n_2 = 2$ (model DEM – *Double Exponential*). Często stosuje się również model dwudiodowy, w którym $n_1 = 1$ i n_2 jest parametrem dopasowania (model VDEM – *Variable Double Exponential*) [28].

Przedstawione modele dobrze opisują charakterystyki I-V większości krzemowych ogniw słonecznych. Dla wielu rodzajów ogniw mogą jednak występować znaczne odstępstwa od tych modeli. Charakterystyki niektórych ogniw mogą mieć ponadto różne artefakty. Znanym typem artefaktów są zniekształcenia charakterystyki, gdy odpowiedź badanego ogniwa jest zbyt wolna w stosunku do szybkości zmiany przy-

kładanego napięcia w trakcie pomiaru. Taki efekt występuje, np. w przypadku ogniw cienkowarstwowych typu CdS/CdTe [29].

Fotoprąd I_{ph} jest wielkością zależną od zaabsorbowanego światła w ogniwie i zwykle nie zależy od napięcia V . Dla niektórych typów ogniw może on jednak zależeć od napięcia. Tak jest np. w ogniwach opartych na krzemie amorficznym ze strukturą $n-i-p$, w których transport nośników przez warstwę i jest zdeterminowany przez pole elektryczne w tej warstwie, a także w innych ogniwach cienkowarstwowych (a-SiGe, CuInSe) [30–32].

Przedstawione modele ogniwa dobrze opisują większość charakterystyk I-V zmierzonych w warunkach quasi-stacjonarnych, tzn. gdy prędkość zmiany napięcia w trakcie pomiaru nie jest zbyt szybka. Takie charakterystyki uzyskuje się, stosując symulatory ze stałym natężeniem światła i przy odpowiednio niskiej prędkości skanowania. Oprócz tego typu symulatorów używa się symulatorów ze światłem błyskowym, w których pomiar charakterystyki przebiega w sposób dynamiczny, zarówno z dużą prędkością zmiany napięcia, jak i również natężenia promieniowania. W tego typu pomiarach ujawnia się wpływ pojemności ogniwa zależnych od napięcia na kształt mierzonej charakterystyki I-V. Taka sytuacja zachodzi w przypadku ogniw o szczególnie dużej pojemności, jak np. w przypadku ogniw HIT. Problemy takie pojawiają się w przypadku nowego typu ogniw, np. organicznych i perowskitowych. Pomiar tych ogniw powinno się wykonywać z użyciem symulatorów ze stałym natężeniem promieniowania i dla odpowiednio małej prędkości skanowania.

W przypadku ogniw, w których pojemność odgrywa znaczącą rolę w czasie pomiaru, schemat zastępczy ogniwa słonecznego może być bardziej złożony. W najprostszym przypadku należy uwzględnić jeszcze jeden kondensator, którego pojemność zmienia się w zależności od wartości napięcia. W czasie wzrostu (obniżenia) natężenia promieniowania kondensator ładuje się (rozładowuje), w wyniku czego mierzony prąd jest mniejszy (większy) niż w przypadku pomiaru w warunkach quasi-ustalonych. Do prądu generowanego światłem I_{ph} musi być dodany jeszcze prąd pojemnościowy I_c dany przez równanie [33]:

$$I_c(t) = C \frac{dV}{dt} + \frac{V(t)dC}{dt} \quad (18)$$

Pojemność ogniwa C jest sumą pojemności dyfuzyjnej C_d i pojemności obszaru ładunku zubożonego C_j [27]. Największe zniekształcenia charakterystyki obserwuje się dla napięcia w punkcie maksymalnej mocy V_m lub dla większych napięć. W tym przypadku pojemność C_j może być zaniedbana. Pojemność C_d zależy od napięcia, zgodnie ze wzorem:

$$C_d = C_0 \exp\left(b \frac{q}{kT} V\right) \quad (19)$$

gdzie b jest parametrem dopasowania, a C_0 jest pojemnością bazy określoną przez długość drogi dyfuzji ładunków mniejszościowych w obszarze bazy L_n (w obszarze typu p w ogniwie ze złączem $n^+ - p$) i może być zapisana równaniem:

$$C_0 = \frac{q}{kT} \frac{qn_i^2}{N_A L_n} \quad (20)$$

W wyniku istnienia prądu pojemnościowego, ogniwa mierzone z użyciem szybko zmiennego oświetlenia mają zaniżone współczynniki wypełnienia, tak jak to zostało udowodnione w [33]. Z równania (18) wynika ponadto, że efekt prądu pojemnościowego może być szczególnie duży w przypadku długiej drogi dyfuzji nośników mniejszościowych L_n (oraz dużego czasu życia nośników) w krzemie, jak na przykład w przypadku ogniw wysokosprawnych wytworzonych na krzemie monokrystalicznym wysokiej jakości.

5. PARAMETRY ELEKTRYCZNE OGNIWA

Na podstawie jasnej charakterystyki I-V określa się podstawowe parametry I_{sc} , V_{oc} , FF , E_{ff} . Na rysunku 7 przedstawiono przykład zmierzonej charakterystyki ogniwa słonecznego z użyciem symulatora promieniowania słonecznego SS200AAA EM produkcji Photo-Emission Tech. zintegrowanego z systemem pomiarowym SS I-V CT-02 produkcji PV Test Solutions (z Wrocławia).

W wyniku pomiaru uzyskuje się zbiór parametrów: V_{oc} , I_{sc} , V_m , I_m , P_m , FF , E_{ff} oraz R_s i R_{sh} lub zbiór parametrów V_{oc} , J_{sc} , V_m , J_m , P_m , FF , E_{ff} oraz r_s i r_{sh} , gdzie $r_s = R_s \times A$ i $r_{sh} = R_{sh} \times A$ (A jest powierzchnią ogniwa). Parametry R_{s0} i R_{sh0} (r_{s0} i r_{sh0}) są pierwszym przybliżeniem rezystancji szeregowej i równoległej odpowiednio, obliczone z nachylenia krzywej I-V w punkcie przecięcia krzywej I-V z osią V i w punkcie przecięcia tej krzywej z osią I . Rezystancje te są dynamiczną rezystancją szeregową i równoległą:

$$r_{s0} = -dV / dJ | V = V_{oc} \quad (21)$$

$$r_{sh0} = -dV / dJ | V = 0 \quad (22)$$

W równaniu (15) dla modelu jednodiodowego dla dużej rezystancji równoległej można pominąć ostatni człon zawierający r_{sh} . Jeśli równanie przekształci się, zlogarytmuje i obliczy pochodną względem J obu stron równania, otrzymuje się:

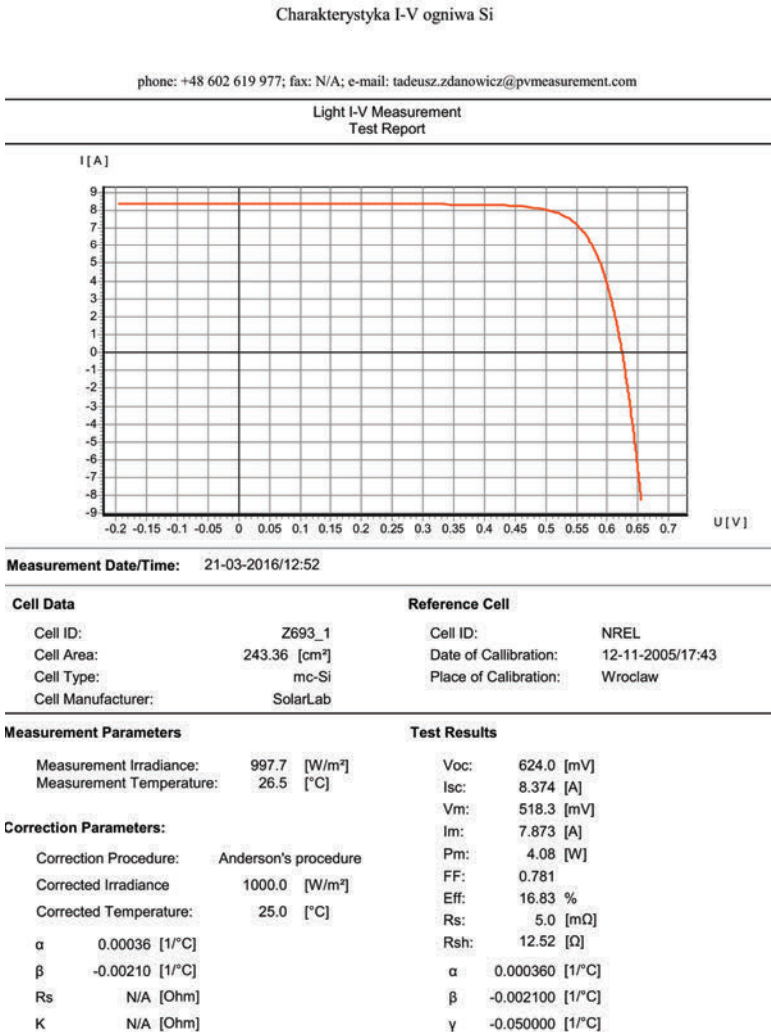
$$-\frac{dV}{dJ} = \frac{nkT}{q} (J_{ph} - J - J_0)^{-1} + r_s \quad (23)$$

Dla $V = V_{oc}$ i $J = 0$, ponieważ $J_{ph} \approx J_{sc} > J_0$ mamy:

$$r_s = r_{s0} - \frac{nV_T}{J_{sc}} \quad (24)$$

gdzie $V_T = \frac{kT}{q} \cong 25,69 \text{ mV}$ dla $T = 298,15 \text{ K}$ ($t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$).

dla $J_{sc} = 20 \text{ mA/cm}^2$, $\frac{nV_T}{J_{sc}} \approx 1,3 \text{ n}$.



Rys. 7. Raport pomiarowy charakterystyki I-V i parametrów elektrycznych ogniwa słonecznego
Fig. 7. Measurement report of I-V characteristic and the electrical parameters of the solar cell

Wartość r_{s0} jest więc większe od r_s o około $1,3n \Omega \text{ cm}^2$ dla takiej gęstości prądu zwarciovego. Dla gęstości prądu 30 mA/cm^2 r_{s0} jest większe od r_s o około $0,9n \Omega \text{ cm}^2$.

Wartość r_{s0} może być znacznie większa od wartości r_s (r_s powinno być mniejsze od $1 \Omega \text{ cm}^2$), zwykle przyjmuje wartości w zakresie $0,1-0,3 \Omega \text{ cm}^2$ dla dobrych ogniw krzemowych.

Podobnie dla małej rezystancji szeregowej, pomijając składniki zawierające r_s w równaniu jednodiodowym i obliczając pochodną obu stron względem V , otrzymujemy:

$$-\frac{dJ}{dV} = \frac{1}{nV_T} J_0 \exp\left(\frac{V}{nV_T}\right) + \frac{1}{r_{sh}} \quad (25)$$

dla $V = 0$ i $J = J_{sc}$

$$\frac{1}{r_{sh0}} = \frac{1}{nV_T} J_0 + \frac{1}{r_{sh}} \quad (26)$$

ponieważ J_0/nV_T jest dużo mniejsze w porównaniu z $1/r_{sh}$, mamy:

$$r_{sh} \approx r_{sh0} \quad (27)$$

Wartość rezystancji dynamicznej r_{sh0} jest więc dobrym przybliżeniem wartości rezystancji równoległej r_{sh} .

Określenie zbioru parametrów występujących w równaniu (16) dla jednego z trzech przedstawionych modeli jest ważnym zagadnieniem, gdyż umożliwia określenie przyczyn degradujących ogniwo, co z kolei jest cenną wskazówką dla poprawy procesów technologicznych wytwarzania ogniwa.

Istnieje wiele metod obliczeniowych, które umożliwiają określenie wszystkich tych parametrów na podstawie jasnej lub ciemnej charakterystyki I-V ogniwa słonecznego. W dalszej części przedstawione są niektóre z tych metod, które wykorzystano w niniejszym opracowaniu.

Parametry określone metodą dopasowania krzywej I-V

Parametry występujące w modelu diody można uzyskać przez dopasowanie krzywej teoretycznej określonej przez jeden z trzech modeli (SEM, DEM, VDEM) do krzywej eksperymentalnej [34].

W literaturze opisanych jest wiele metod ekstrakcji zbioru parametrów występujących w modelach diody. Podstawowym problemem jest zdefiniowanie funkcji celu, która przedstawia różnicę pomiędzy krzywą teoretyczną i eksperymentalną. Metodą iteracji szuka się parametrów, dla których funkcja celu przyjmuje najmniejszą wartość. Najczęściej funkcją celu jest średnie odchylenie standardowe:

$$SD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(I_{\text{exp}})_i - (I_{\text{teor}})_i]^2} \quad (28)$$

Przyjęcie takiego kryterium prowadzi do dobrego dopasowania krzywej w pobliżu V_{oc} , natomiast do gorszego dopasowania w pobliżu I_{sc} [35]. Inne kryterium jakości dopasowania zaproponował Chan [35], który za funkcję celu przyjął pole powierzchni pomiędzy krzywą eksperymentalną i teoretyczną. Jakość dopasowania opisana jest przez parametr ε :

$$\varepsilon = \frac{\Delta A}{A} \times 100\% \quad (29)$$

Gdzie ΔA jest powierzchnią pomiędzy krzywymi, natomiast A powierzchnią pod krzywą eksperymentalną.

Inne podejście przedstawione w pracy Żdanowicza [34] polega na zmodyfikowaniu funkcji celu przez wprowadzenie funkcji wagowej. Dla standardowego odchylenia zmodyfikowana funkcja celu jest określona przez równanie (30):

$$SD \text{ (zmodyfikowane)} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N c_i [(I_{\text{exp}})_i - (I_{\text{teor}})_i]^2} \quad (30)$$

Wartości współczynników c_i określone są dla różnych funkcji wagowych (w programie PV Solution 17 funkcji wagowych). W pracy [34] przedstawiono dokładność dopasowania, którego miarą jest wielkość ΔA dla różnych funkcji wagowych. Minimalizację tak zdefiniowanej funkcji celu przeprowadzano numerycznie z zastosowaniem simpleksowej metody spadku. Najlepsze dopasowanie uzyskano, gdy współczynniki c_i zdefiniowano z użyciem funkcji eksponencjalnej:

$$c_i = 1 - 1,72 / [\text{Exp}(V_{\text{exp}})_i - 1] \quad (31)$$

gdzie i jest numerem punktu pomiarowego.

Parametry uzyskane z użyciem regresji liniowej

Dla modelu jednodiodowego, gdy rezystancja równoległa r_{sh} jest duża, można po przekształceniach uzyskać następujące równania [36]:

$$-\frac{dV}{dJ} = \frac{nkT}{q} (J_{sc} - J)^{-1} + r_s \quad (32)$$

$$\ln(J_{sc} - J) = \frac{q}{nkT} (V + r_s \times J) + \ln J_0 \quad (33)$$

Z równań tych można w prosty sposób określić r_s i J_0 . Metoda polega na wykonaniu wykresu $\left(-\frac{dV}{dJ}\right)$ w funkcji $(J_{sc} - J)^{-1}$ i dopasowaniu wykresu funkcją liniową.

Z przecięcia linii prostej z osią $(-dV/dJ)$ można odczytać rezystancję szeregową. Z nachylenia prostej można określić także współczynnik jakości diody. Z równania (33) można w podobny sposób, robiąc wykres $\ln(J_{sc} - J)$ w funkcji $(V + r_s \times J)$, określić r_s oraz J_0 .

Parametry określone z użyciem funkcji Lambert W

Ponieważ w równaniu diodowym symbol I występuje po obu stronach równania, a równanie składa się z części liniowej i eksponencjalnej, wyrażenie prądu I w funkcji napięcia *explicite* jest trudnym zadaniem matematycznym. Okazuje się, że istnieje jego dokładne analityczne rozwiązanie z użyciem tzw. funkcji Lamberta W .

Funkcja ta jest rozwiązaniem równania $W(x)\exp W(x) = x$, gdzie x należy do zbioru liczb rzeczywistych.

Dokładne analityczne rozwiązanie dla prądu może być przedstawione w postaci [37–39]:

$$I = \frac{nV_T}{R_s} W_0 \left[\frac{R_s}{nV_T} \left(I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_s + R_{sh}} \right) \exp \left(\frac{-V_{oc}}{nV_T} \right) \exp \frac{1}{nV_T} \left(R_s I_{sc} + \frac{R_{sh} V}{R_s + R_{sh}} \right) \right] + \frac{V}{R_s} - I_{sc} - \frac{R_{sh} V}{R_s (R_s + R_{sh})} \quad (34)$$

gdzie W_0 jest główną gałęzią funkcji Lamberta W .

W równaniu tym są tylko trzy parametry n , R_s i R_{sh} , które trzeba znaleźć metodą dopasowania. W pracy [39] określono je metodą najmniejszych kwadratów z użyciem programu Matlab. Po określeniu tych parametrów pozostałe parametry I_0 i I_{ph} można obliczyć, korzystając ze wzorów:

$$I_0 = \left(I_{sc} + \frac{R_s I_{sc} - V_{oc}}{R_{sh}} \right) \exp \left(-\frac{V_{oc}}{nV_T} \right) \quad (35)$$

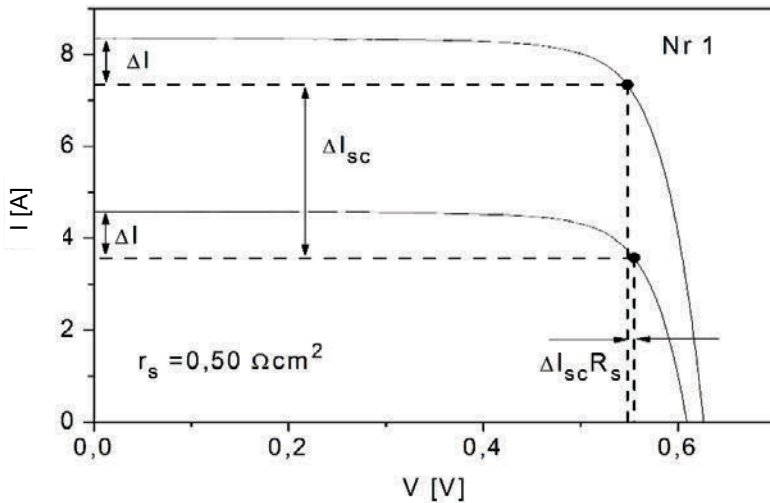
$$I_{ph} = I_{sc} + \frac{R_s I_{sc}}{R_{sh}} - I_0 \quad (36)$$

Metoda ta jest szczególnie skuteczna w przypadku ogniw, których charakterystyki bardzo się różnią od charakterystyk idealnych z powodu dużej rezystancji szeregowej, małej rezystancji równoległej czy też dużej wartości współczynnika jakości diody n . Dla tego typu ogniw ekstrakcja wszystkich naraz pięciu (w modelu SEM) lub większej

liczby parametrów (w modelach DEM i VDEM) z użyciem iteracji często daje wartości parametrów niemających sensu fizycznego, np. ujemne wartości rezystancji szeregowej.

Określenie rezystancji szeregowej z pomiaru charakterystyki I-V dla dwóch różnych intensywności światła

Określenie rezystancji szeregowej, oparte na pomiarze dwóch krzywych I-V dla dwu różnych natężeń światła przedstawili Wolf i Rauschenbacht w pracy [40]. Na rysunku 8 zobrazowano metodę obliczenia rezystancji szeregowej R_s [Ω] i znormalizowanej rezystancji szeregowej $r_s = R_s \times A$ [$\Omega \text{ cm}^2$] dla krzemowego ogniwa słonecznego nr 1 (tab. 6).



Rys. 8. Wyznaczanie rezystancji szeregowej z charakterystyki I-V dla dwóch różnych intensywności światła

Fig. 8. Determination of the series resistance of the characteristics of I-V for two different light intensity

Można łatwo wykazać, że charakterystyki te są przesunięte względem siebie wzdłuż osi – Y o ΔI_{ph} i wzdłuż osi – X o $\Delta I_{ph} \times R_s$ [40]. Ważne jest, aby $I_{ph} \approx I_{sc}$, co jest spełnione, gdy charakterystyka I-V nie jest pochylona dla małych napięć [40]. Jeśli więc odczyta się z wykresów, jakie jest przesunięcie jednego wybranego punktu na charakterystyce w wyniku zmiany oświetlenia, można określić R_s . W praktyce wybiera się punkt na jednej charakterystyce, dla którego prąd wynosi $I_{sc1} - \Delta I$. Podobnie wybiera się punkt na drugiej charakterystyce, dla którego prąd wynosi $I_{sc2} - \Delta I$. Wartość przedziału ΔI jest dowolna, najlepiej jednak tak dobrać tę wartość, by rozpatrywane dwa punkty leżały w pobliżu punktów (I_m, V_m) .

W [40] pokazano jednak, że wartość R_s zależy od wyboru przedziału ΔI , tzn. zależy od wyboru punktów na krzywej I-V. Według autorów jest to związane z użyciem zbyt uproszczonego modelu ogniwa.

Określenie rezystancji szeregowej i innych parametrów z pomiaru charakterystyki $I_{ph}-V_{oc}$

Z równania diodowego (SEM) wynika, że dla $I = 0$:

$$I_{ph} = I_0 \left[\exp\left(\frac{V_{oc}}{nV_t}\right) - 1 \right] + \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (37)$$

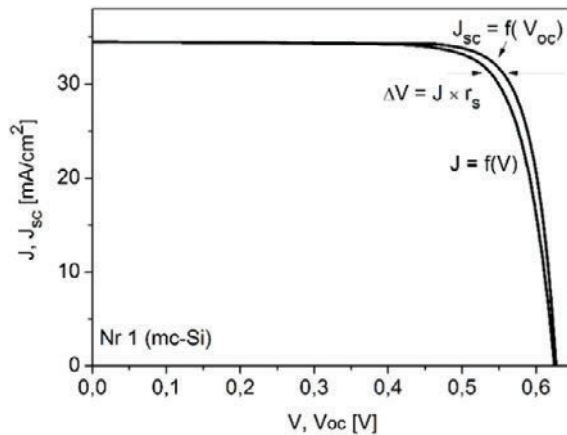
Zmieniając natężenie światła, uzyskuje się charakterystykę $I_{ph}(P_{in}) = f(V_{oc})$. Z charakterystyki tej po zmianie znaku I_{ph} (z dodatniego na ujemny) i przesunięciu o wartość $I_{ph}(P_{in} = 1 \text{ kW/m}^2)$ dla warunków STC otrzymuje się jasną charakterystykę taką, jaką miałyby ogniwo słoneczne, gdyby $R_s = 0$. Porównując dwie charakterystyki, eksperymentalną i uzyskaną po przekształceniu charakterystykę $I_{ph} - V_{oc}$, można określić R_s : $R_s = \Delta V / I$, gdzie ΔV jest różnicą napięć pomiędzy dwoma charakterystykami dla danej wartości I . Ponieważ nie znamy dokładnej wartości I_{ph} , można ją zastąpić przez I_{sc} , o ile $I_{sc} \approx I_{ph}$ lub I_{sc} jest proporcjonalne do natężenia oświetlenia, tak jak to zwykle zachodzi, o ile rezystancja szeregowa lub natężenie światła nie są zbyt duże [40]. Alternatywną metodą jest wyznaczanie charakterystyki natężenia promieniowania słonecznego w funkcji napięcia V_{oc} . Wykorzystuje się tutaj fakt, że I_{ph} jest proporcjonalny do natężenia promieniowania aż do bardzo silnie skoncentrowanego światła. Metoda ta opracowana przez Sintona i wsp. [41,42] wykorzystana jest w systemie pomiarowym „suns- V_{oc} ”. Pomiar z użyciem tego systemu polega na oświetleniu światłem błyskowym ogniwa o dużej stałej czasowej zaniku natężenia światła i równoczesnym pomiarze napięcia V_{oc} w funkcji malejącego natężenia światła w czasie jednego błysku. Do monitorowania natężenia promieniowania używa się oddzielnego ogniwa referencyjnego. Z charakterystyki „suns- V_{oc} ” określona jest charakterystyka natężenia oświetlenia (natężenie światła podane jest w liczbie „słońce” („1 słońce” = 1 kW/m^2)). Porównując dwie charakterystyki eksperymentalną oraz przekształconą charakterystykę „suns- V_{oc} ” (po zamianie natężenia światła na gęstość prądu i transformacji jak opisano powyżej), uzyskuje się wartości R_s . Na rysunku 9 zobrazowano sposób określenia rezystancji szeregowej. System pomiarowy „suns- V_{oc} ” umożliwia również uzyskiwanie innych ważnych parametrów. Wprowadzając dodatkowe dane do arkusza kalkulacyjnego systemu pomiarowego „suns- V_{oc} ”, takie jak gęstość prądu zwarcowego J_{sc} , grubość ogniwa, rezystywność materiału, typ przewodnictwa półprzewodnika (n lub p), można uzyskać parametry: wartości współczynnika wypełnienia FF i sprawności E_{ff} dla hipotetycznego ogniwa, dla którego $R_s = 0$, oznaczone przez PFF (ang. *Pseudo-Fill Factor*), PE_{ff} (ang. *Pseudo-Efficiency*) oraz parametry diody badanego ogniwa dla modelu

dwudiodowego (DEM) R_s , R_{sh} , J_{01} , J_{02} , a także efektywny czas życia nośników w funkcji koncentracji nośników.

Efektywny czas życia τ_{eff} określony jest przez równanie [41,42]:

$$\tau_{eff} = \frac{n_i^2 \exp\left(\frac{V_{oc}}{V_T}\right)}{\frac{J_{ph}[N_A + \Delta n]}{qW}} \quad (38)$$

gdzie: n_i – koncentracja samoistnych nośników, W – grubość ogniwa, N_A – koncentracja nośników w płytce krzemowej (np. akceptorów w krzemie typu p) określonej z rezystywności płytki Si. Metodę stosuje się tylko do ogniw krzemowych o znanej rezystywności wyjściowego materiału ogniw.



Rys. 9. Wykres zależności $J_{sc} = f(V_{oc})$ zmierzona z użyciem stanowiska „suns- V_{oc} ” i charakterystyka J-V ogniwa krzemowego

Fig.9. The plot of the $J_{sc} = f(V_{oc})$ measured using the “suns- V_{oc} ” set-up” and J-V characteristics of silicon cell

6. SPRAWNOŚĆ KWANTOWA I ODPOWIEDŹ WIDMOWA

Pomiar odpowiedzi widmowej (SR) ogniwa dostarcza wiele informacji dotyczących różnych mechanizmów strat prądu zwarciego w różnych obszarach ogniwa. Ponieważ współczynnik absorpcji α w krzemie silnie zależy od długości fali światła, światło w zakresie długości fal 400–500 nm daje informacje o przedniej powierzchni i emiterze, podczas gdy światło w zakresie długości fal 900–1100 nm daje informacje o materiale bazowym i tylnej powierzchni. W czasie pomiaru odpowiedzi widmowej

ogniwo jest oświetlone monochromatycznym światłem o różnych długościach fal i mierzony jest prąd zwarciovowy $I_{sc}(\lambda)$.

Odpowiedź widmowa $SR(\lambda)$ jest zdefiniowana przez:

$$SR(\lambda) = \frac{I_{sc}(\lambda)}{P_{in}(\lambda)} \quad (39)$$

gdzie $P_{in}(\lambda)$ jest natężeniem światła padającego na ogniwo o długości λ .

Znając odpowiedź widmową ogniwa $SR(\lambda)$, można obliczyć tzw. zewnętrzną sprawność kwantową $EQE(\lambda)$ na podstawie równania:

$$EQE(\lambda) = SR(\lambda) \frac{hc}{q\lambda} \quad (40)$$

gdzie:

c – prędkość światła w próżni,

h – stała Plancka,

q – ładunek elementarny.

Zewnętrzna sprawność kwantowa ma prostą interpretację fizyczną: przedstawia ona prawdopodobieństwo zdarzenia, że padający na powierzchnię ogniwa foton przyczyni się do powstania przepływu prądu. Innymi słowy jest to stosunek par generowanych nośników, rozdzielonych przez złącze do liczby fotonów padających na ogniwo dla określonej długości fali.

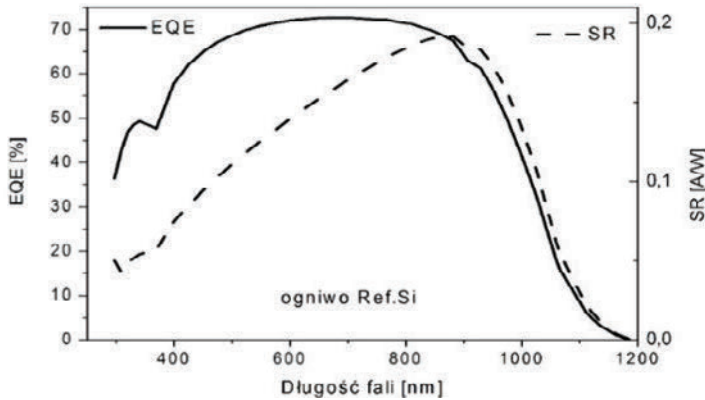
Podobnie można zdefiniować wewnętrzną sprawność kwantową IQE , która w odróżnieniu od zewnętrznej sprawności kwantowej określa liczbę generowanych par nośników tylko przez fotony zaabsorbowane przez krzem. Znając współczynnik odbicia światła od powierzchni ogniwa w funkcji długości fali $R(\lambda)$, wewnętrzna sprawność kwantowa IQE określona jest przez równanie:

$$IQE(\lambda) = EQE(\lambda) \frac{1}{1 - R(\lambda)} \quad (41)$$

Na rysunku 10 przedstawiona jest zewnętrzna sprawność kwantowa ogniwa oraz odpowiedź widmowa ogniwa wzorcowego używanego do kalibracji symulatora promieniowania słonecznego wykalibrowanego w Instytucie Fraunhofera ISE. Znając zewnętrzną sprawność kwantową EQE , można obliczyć gęstość prądu zwarciovowego dla rozkładu strumienia fotonów $N_{ph}(\lambda)$ widma światła słonecznego typu AM1,5G:

$$J_{sc} = q \int EQE(\lambda) N_{ph}(\lambda) d\lambda \quad (42)$$

gdzie N_{ph} – strumień fotonów padających na jednostkę powierzchni ogniwa.



Rys. 10. Zewnętrzna sprawność kwantowa EQE i odpowiedź widmowa SR krzemowego ogniwa wzorcowego Ref. Si (005-2013) zmierzonego w Instytucie Fraunhofera ISE
 Fig. 10. The external quantum efficiency EQE and the spectral response SR of the reference Ref. Si (005-2013) silicon cell measured in ISE Fraunhofer

7. WSPÓŁCZYNNIKI TEMPERATUROWE

Jak już zostało pokazane na rysunku 4 maksymalne wartości sprawności ogniw, obliczone według metody S-Q, zmniejszają się wraz ze wzrostem temperatury. Dupré i wsp. [21] przedstawili mechanizmy degradujące ogniwo na podstawie fundamentalnych temperaturowych strat w konwersji fotowoltaicznej dla ogniwa idealnego. Temperaturową zależność ogniwa słonecznego parametru G (np. V_{oc} , I_{sc} , E_{ff}) opisuje się jako liniową zależność współczynnika temperaturowego $\beta_G(T_c)$ od temperatury T_c . Najczęściej współczynnik ten podaje się w postaci znormalizowanej do wartości, jaką przyjmuje w temperaturze 25 °C i wyraża się w jednostkach [%/K]:

$$\beta_G(T_c)[\%/K] = \frac{10^2}{G(298,15K)} \frac{G(T_c) - G(298,15K)}{T_c - 298,15} \quad (43)$$

Żeby zbadać jak współczynnik temperaturowy mocy zależy od współczynników temperaturowych parametrów elektrycznych ogniwa, trzeba wziąć pod uwagę równanie:

$$P_{\max(T_c)} = V_m(T_c) \times J_m(T_c) = FF(T_c) \times J_{sc}(T_c) \times V_{oc}(T_c) \quad (44)$$

gdzie V_m i J_m są to napięcie i gęstość prądu w punkcie maksymalnej mocy, a P_{\max} jest maksymalną mocą na jednostkę powierzchni.

Ponieważ parametry V_{oc} , J_{sc} , FF i P_{\max} zależą z dużą dokładnością liniowo od temperatury, współczynnik temperaturowy (znormalizowany) maksymalnej mocy może być przedstawiony wzorem:

$$\beta_{P_{\max}} = \beta_{V_{oc}} + \beta_{J_{sc}} + \beta_{FF} \quad (45)$$

Zależności temperaturowe poszczególnych współczynników temperaturowych zależą od różnych mechanizmów strat mocy w ogniwie, związanych ze wzrostem temperatury. Główny wpływ temperatury na moc ma współczynnik temperaturowy napięcia obwodu otwartego V_{oc} . Napięcie to zależy od ciemnego prądu nasycenia ogniwa I_0 w modelu jednodiodowym. W modelu dwudiodowym zależy I_{01} i od I_{02} . Natomiast prąd zwarcia ogniwa nie zależy silnie od temperatury i jego zależność związana jest ze zmianą przerwy energetycznej wraz z temperaturą.

Ponieważ

$$I_{sc} = I_0 \left(e^{\frac{V_{oc}}{kT}} - 1 \right) \quad (46)$$

zaniedbując składnik -1 w równaniu (5), można uzyskać przybliżoną zależność (47):

$$I_{sc} \approx I_0 e^{\frac{V_{oc}}{kT}} \approx BT^\zeta e^{-\frac{E_G(0)}{kT}} e^{\frac{qV_{oc}}{kT}} \quad (47)$$

gdzie parametr B nie zależy od T , $E_G(0)$ jest ekstrapolowaną do zera stopni szerokością przerwy energetycznej, a parametr ζ przyjmuje zwykle wartości z zakresu 1–4 [43].

Ponieważ I_{sc} słabo zależy od T , obliczając pochodną względem T , otrzymuje się zależność temperaturową napięcia V_{oc} [43]:

$$\frac{dV_{oc}}{dT} = -\frac{\frac{1}{q} E_G(0) - V_{oc} + \zeta \frac{kT}{q}}{T} \quad (48)$$

Dla krzemu $E_G(0) \approx 1,2$ eV, $V_{oc} \approx 0,6$ V, $\zeta \approx 3$, $T = 300$ K, zatem z równania (48) wynika przybliżona wartość $\frac{dV_{oc}}{dT} \approx -2,3$ mV/K, lub $\beta_{V_{oc}} = -0,38\%/K$. Wielkość tego parametru zależy od przerwy energetycznej. Im większa przerwa, tym słabsza zależność napięcia V_{oc} od temperatury. Zależy ona również od napięcia ogniwa V_{oc} . Dla wysokosprawnych ogniw krzemowych charakteryzujących się wysokim napięciem V_{oc} jego wartość może być mniejsza od oszacowanej powyżej [44, 45].

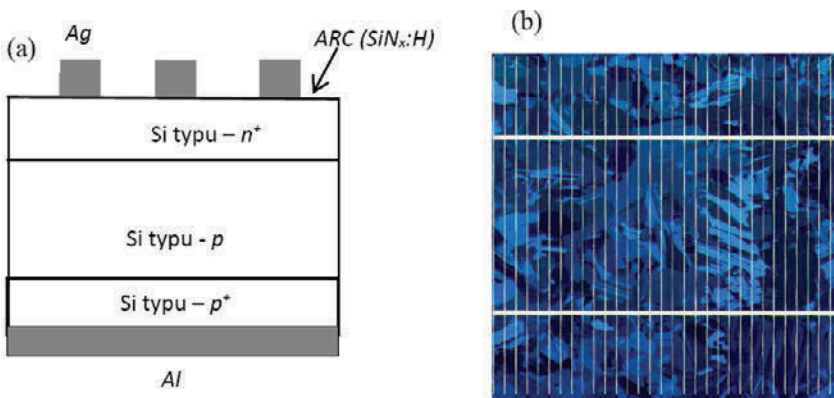
8. ANALIZOWANE OGNIWA SŁONECZNE

8.1. KRYSTALICZNE OGNIWA KRZEMOWE

Standardowe ogniwo

Na rysunku 11 przedstawiono schematycznie przekrój typowego produkowanego obecnie jednozłączowego krzemowego ogniwa słonecznego (a) oraz widok górnej

powierzchni ogniwa słonecznego (b) wytworzonego w IMIM PAN. Materiałem bazowym jest płytka z krystalicznego krzemu typu p o grubości około 0,3 mm i rezystywności $\rho = 1\text{--}5 \Omega\cdot\text{cm}$. W górnej części płytki wytworzona jest warstwa n^+ (o grubości $< 1 \mu\text{m}$) tzw. emiter. W dolnej części płytki występuje warstwa p^+ . Górna elektroda zbierająca występuje w postaci siatki, podczas gdy dolna elektroda całkowicie przykrywa tylną powierzchnię. Dodatkowymi elementami jest warstwa antyrefleksyjno-pasywująca (jedna warstwa spełniająca równocześnie dwie funkcje, np. $\text{SiN}_x\text{:H}$ lub układ dwóch warstw: pasywująca bezpośrednio na krzemie w postaci SiO_2 i powyżej, warstwa antyrefleksyjna, np. TiO_2). Krzemowe ogniwa słoneczne oparte na krzemie mono- (sc-Si) i multikrystalicznym (mc-Si) wytwarza się w skali masowej z użyciem technologii składającej się z kilku etapów, przedstawionych w tabeli 1 [46–49].

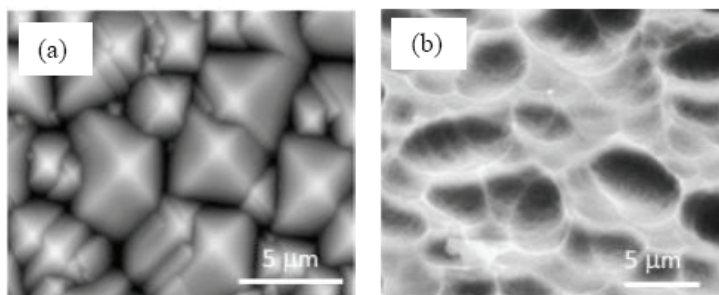


Rys. 11. Schemat budowy typowego krzemowego ogniwa słonecznego (a).
Ogniwo wytworzone w IMIM PAN z krzemu mc-Si o rozmiarze $10 \times 10 \text{ cm}$ (b)

Fig. 11. Scheme of a typical silicon solar cell (a).

The cell produced in IMMS PAS mc-Si with a size of $10 \times 10 \text{ cm}$ (b)

Zasadnicze elementy technologii wytwarzania krzemowych ogniw słonecznych były opracowane już w latach 80. i 90. XX w. Jednym z istotnych elementów wprowadzonych na początku lat 80. było teksturuwanie powierzchni płytek krzemowych w celu zmniejszenia odbicia światła. W wyniku trawienia chemicznego krzemu monokrystalicznego o orientacji (100) na powierzchni powstają piramidy ograniczone ścianami o orientacji (111), tak jak przedstawiono na rys. 12a. Ponieważ metoda ta nie jest zbyt odpowiednia dla krzemu polikrystalicznego (mc-Si), do teksturuwania tego typu krzemu najczęściej stosuje się trawienie kwasowe, które powoduje powstanie na powierzchni owalnych jamek (rys. 12b). Najbardziej istotnym ulepszeniem wprowadzonym w ostatnim dziesięcioleciu w technologii ogniw opartych na krzemie multikrystalicznym było zastąpienie warstwy antyrefleksyjnej (ARC) TiO_x przez warstwę $\text{SiN}_x\text{:H}$, spełniającą równocześnie trzy funkcje: warstwy antyrefleksyjnej, warstwy pasywującej powierzchnię i defekty objętościowe.



Rys. 12. Tekstury powierzchni – krzemu monokrystalicznego (100) trawionego alkalicznie w KOH (a), krzemu multikrystalicznego mc-Si trawionego kwasowo (b)

Fig. 12. Surface textures – monocrystalline silicon (100) etched in an alkaline KOH (a), multicrystalline mc-Si etched in acid (b)

Tabela 1. Etapy procesu technologicznego wytwarzania ogniwa krzemowego [46–49]
Table 1. Processing sequences for producing silicon cell [46–49]

Etap	Proces technologiczny
1	Wstępna obróbka chemiczna płytki Si
2	Teksturowanie powierzchni
3	Formowanie złącza $n^+ - p$
4	Trawienie krawędzi
5	Naniesienie warstwy antyrefleksyjnej i pasywującej ($\text{SiN}_x\text{:H}$ lub $\text{TiO}_x/\text{SiO}_2$)
6	Sitodruk przedniego i tylnego kontaktu z użyciem past metalicznych (srebrowych i aluminiowych)
7	Wypalanie past i formowanie kontaktów

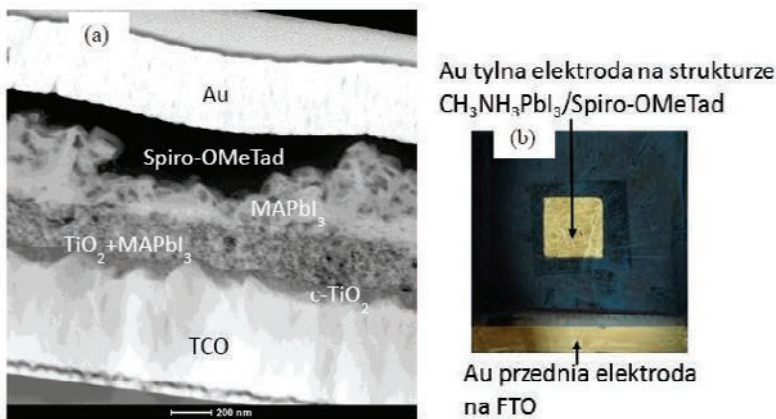
8.2. OGNIWA PEROWSKITOWE

W ciągu kilku ostatnich lat daje się zauważyć bardzo szybki rozwój ogniw słonecznych na bazie materiałów perowskitowych [50–54]. Należą one obecnie do najbardziej perspektywicznych ogniw cienkowarstwowych, dzięki ich unikatowym właściwościom, które ułatwiają wytworzenie ogniw o wysokiej sprawności z wykorzystaniem tanich i niskotemperaturowych technologii.

Po raz pierwszy ogniwa słoneczne na bazie perowskitu o chemicznym wzorze $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ (MAPbI_3) zostały zademonstrowane w roku 2009. W 2012 r. ich sprawność konwersji wynosiła około 10%, a po upływie kilku lat, w 2016 r., sprawność ogniw perowskitowych sięgnęła już 22,1%.

Ogniwa perowskitowe wytwarza się w dwóch strukturach. W jednej z nich perowskit osadza się na mezoporowatej warstwie tlenku metalu takiego, jak: TiO_2 , Al_2O_3 lub ZnO [50]. Na rysunku 13a przedstawiona jest mikrostruktura uzyskana z użyciem

skaningowego mikroskopu elektronowego (STEM) przekroju ogniwa perowskitowego wytworzonego w IMIM PAN [55]. Elektrode przednią stanowi warstwa przewodzącego tlenku metalu TCO (ang. *Transparent Conductive Oxide*). Najczęściej jest nią tlenek cyny domieszkowany fluorem (FTO) lub tlenek indy (ITO) osadzony bezpośrednio na powierzchni szkła. Na warstwie TCO wytwarza się zwartą warstwę blokującą TiO_2 , która zostaje utwardzona w procesie wypalenia w temperaturze około $500\text{ }^\circ\text{C}$. Następny krok stanowi nadrukowanie mezoporowatej warstwy tlenku metalu, np. TiO_2 , Al_2O_3 lub ZnO , metodą sitodruku, która również zostaje poddana procesowi wypalenia w temperaturze około $500\text{ }^\circ\text{C}$. Na tak wytworzonej warstwie osadza się perowskit halogenkowy, np. $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$, $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$, który wnika w pory warstwy tlenku metalu. Na powierzchni perowskitu osadzona zostaje organiczna warstwa przewodząca dziury (warstwa HTM). Najczęściej stosowaną warstwę HTM stanowi 2,2,7,7-tetrakis-(N,N-di methoxyphenylamine) 9,9-bifluorene popularnie znany pod skróconą nazwą spiro-OMeTad. Ostatnim krokiem jest naporowanie próżniowe tylnej elektrody metalowej (Au, Ag) bezpośrednio na warstwie HTM. To właśnie dla takiej struktury uzyskano najwyższą sprawność.



Rys. 13. Mikrostruktura STEM ogniwa perowskitowego wykonanego w IMIM PAN (a), fotografia tylnej powierzchni ogniwa perowskitowego (b) [55]

Fig. 13. STEM microstructure of perovskite solar cell made in IMMS PAS (a), photograph of back side of perovskite solar cell (b) [55]

9. PROBLEMY POMIAROWE

9.1. SYMULATORY PROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO

Ze względu na to, że naturalne widmo światła słonecznego zmienia się wraz z wysokością Słońca i zależy od wielu czynników atmosferycznych (zachmurzenie, wil-

gotność powietrza, zanieczyszczenie powietrza), pomiar parametrów ogniw i modułów fotowoltaicznych przeprowadza się z użyciem sztucznych źródeł promieniowania, tzw. symulatorów promieniowania słonecznego. Światło emitowane przez symulatory musi spełniać wiele warunków takich, jak: odpowiedni rozkład widma promieniowania, odpowiednia jednorodność promieniowania na powierzchni stolika pomiarowego oraz krótka i długa czasowa jego stabilność.

W rzeczywistości nie istnieją takie symulatory, których widmo byłoby identyczne z widmem słonecznym AM1,5G. Dlatego też, zgodnie ze standardem PN-EN 60904-9:2008 (IEC 60904-9) [56], wprowadzono trzy klasy symulatorów w zależności od wielkości odstępstwa od standardowego widma słonecznego AM1,5G.

Istnieje jeszcze czwarta klasa A+A+A+, która nie jest jeszcze włączona do standardu IEC, zdefiniowana przez TÜV Rheinland dla symulatorów modułów PV firmy Passan SA (Meyer Burger Technology Group), mające wszystkie parametry lepsze od klasy A (niedopasowanie spektralne, niejednorodność i stabilność) oraz z rozszerzonym zakresem widma 300–1200 nm) [57].

Dla określenia odstępstwa widma symulatora od widm AM1,5 określa się całki z irradancji promieniowania słonecznego $P_{AM1,5}$ i promieniowania symulatora P_{sym} dla zakresów fal 400–500, 500–600, 600–700, 800–900 i 900–1100 nm i określa się wartości ilorazu R ($R = P_{sym}/P_{AM1,5}$) (tab. 2). W zależności od wartości ilorazu R , zgodnie z normą PN-EN 60904-9:2008 [56], symulatory dzieli się na klasy A, B, C.

Poza spektralnym niedopasowaniem, symulatory dzieli się również na cztery klasy ze względu na niejednorodność promieniowania oraz czasową niestabilność promieniowania, która może być krótko- i długoczasowa. W tabeli 3 przedstawione są trzy klasy symulatorów. Oznaczenie klasy trzema literami, np. AAA, odnosi się do spektralnego niedopasowania, niejednorodności rozkładu irradancji na powierzchni stolika pomiarowego oraz czasowej niestabilności.

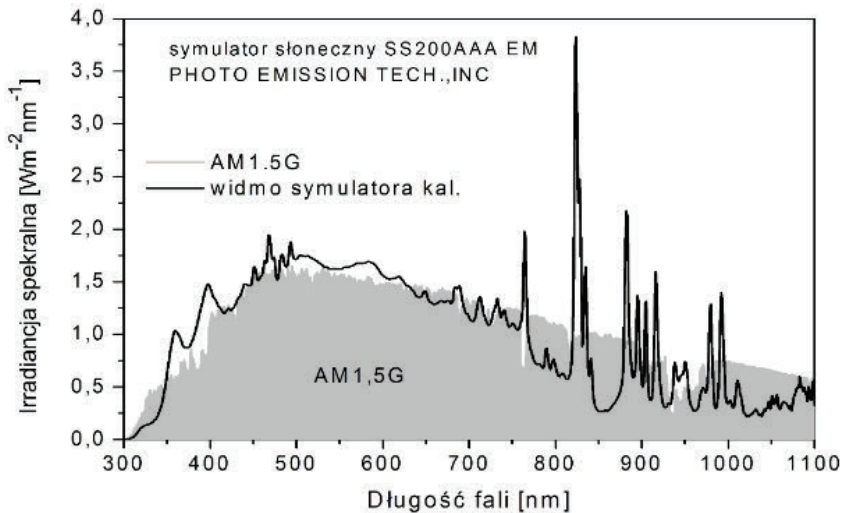
Tabela 2. Rozkład promieniowania AM1.5G
zgodnie z normą PN-EN 60904-9:2008 [56]
Table 2. Distribution of radiation AM1.5G in accordance
with the standard PN-EN 60904-9:2008 [56]

	Zakres długości fal [nm]	Procentowy udział całkowitej irradancji w zakresie 400–1100 nm [758,5 Wm ⁻²]
1	400–500	18,4
2	500–600	19,9
3	600–700	18,4
4	700–800	14,9
5	800–900	12,5
6	900–1100	15,9

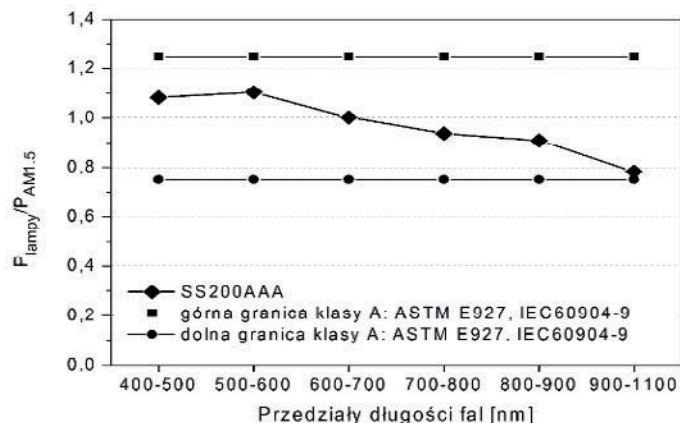
Tabela 3. Klasy symulatora zgodnie z normą PN-EN 60904-9:2008 [56]
 Table 3. Class simulator in accordance with the standard PN-EN 60904-9:2008 [56]

Klasa symulatora	Spektralne niedopasowanie dla każdego specyfikowanego przedziału ($P_{sym}/P_{AM1.5}$)	Niejednorodność promieniowania [%]	Czasowa niestabilność promieniowania	
			krótkoczasowa STI [%]	długoczasowa LTI [%]
AAA	$\pm 25\%$ (0,75–1,15)	2	0,5	2
BBB	$\pm 40\%$ (0,60–1,40)	5	2	5
CCC	+100–60%	10	10	10

W Laboratorium Fotowoltaicznym IMIM PAN w Kozach do pomiaru charakterystyk I-V używa się symulatora ze źródłem promieniowania ciągłego firmy Photo-emission Techn. Inc. (USA). Źródłem światła jest lampa ksenonowa. Symulator należy do klasy AAA, zgodnie z wymaganiami standardu PN-EN 60904-9:2008 (IEC 60904-9) [56]. Widmo symulatora zmierzone z użyciem optycznego analizatora widma AQ-6315B firmy Ando Electric Co. Ltd. (Japan) przez PV Test Solutions z Wrocławia przedstawiono na rys. 14. Spektralne niedopasowanie dla każdego specyfikowanego przedziału (rys. 15) mieści się w granicach przyjętych w podanym standardzie.



Rys. 14. Irradiancja spektralna promieniowania słonecznego AM1.5G oraz promieniowania symulatora SS200AAA EM po kalibracji
 Fig. 14. Spectral radiance of solar radiation and radiation AM1.5G SS200AAA EM simulator after calibration



Rys. 15. Spektralne niedopasowanie dla każdego specyfikowanego przedziału symulatora SS200AAA EM (w Laboratorium Fotowoltaicznym IMIM PAN w Kozach)

Fig. 15. Spectral mismatch for each of the specified interval SS200AAA EM simulator (in the Photovoltaic Laboratory of IMMS PAS in Kozy)

Niejednorodność oświetlenia

Drugim ważnym czynnikiem determinującym dokładność pomiaru parametrów elektrycznych z użyciem symulatora jest niejednorodność irradancji na powierzchni stolika pomiarowego. Pomiaru niejednorodności przeprowadza się, używając ogniwo (fotodetektora) o małej powierzchni w stosunku do pola powierzchni stolika.

Dla SS200 AAA, którego stół pomiarowy ma rozmiary 21×21 cm, pole pod lampą o rozmiarze 30×30 cm dzieli się na 36 kwadratów o rozmiarze 5×5 cm i wykonuje się pomiar prądu zwarciovego z użyciem ogniwa słonecznego w każdym kwadracie. Do obliczenia niejednorodności trzeba znać największą wartość prądu zwarciovego I_{\max} i najmniejszą wartość I_{\min} . Niejednorodność oświetlenia stolika pomiarowego obliczana jest ze wzoru:

$$\text{Niejednorodność } (\pm\%) = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}) \times 100\% \quad (49)$$

W celu wyeliminowania wpływu niejednorodności oświetlenia na parametry ogniwa należy używać wzorców, których wymiary byłyby takie jak badanych ogniwo lub w przypadku wzorca małych rozmiarów kalibrować lampę symulatora dla średniej wartości oświetlenia o natężeniu 1000 W/m².

Rozkład kątowy promieniowania

Nie ma żadnych określonych wymagań co do rozkładu kąтового promieniowania symulatora. Promieniowanie to może zawierać dużą część promieniowania rozproszonego (znacznie większą niż promieniowanie AM1,5G), co może być źródłem dodatkowej niepewności pomiarowej w przypadku pomiaru ogniwo o małych powierzchniach.

niach, jak np. w przypadku ogniw organicznych lub perowskitowych. Problemy pomiarowe z takimi ogniwami przedstawione są w kolejnym rozdziale.

Wzorce

Do kalibracji symulatora słonecznego używa się ogniwa wzorcowe zmierzone w akredytowanym laboratorium. W pracy używano trzech wzorców zmierzonych w Laboratorium Fraunhofera ISE dla warunków STC, tzn. dla natężenia światła: 1000 W/m², temperatury mierzonego ogniwa: 25 °C i widma rozkładu irradiancji: AM1,5G (z 2008 r.). W tabeli 4 podane są parametry elektryczne wzorców.

Tabela 4. Wzorce używane do kalibracji symulatora
Table 4. Solar Reference Cells Calibration

Nr seryjny	Ogniwo	I_{sc} [mA]	V_{oc} [mV]	FF [%]
005-2013	Si	108,8 ± 2,1	630,1 ± 1,9	80,38 ± 0,52
057-2012	Si + filtr kG3	51,8 ± 1,3	612,4 ± 3,1	82,04 ± 0,82
066-2012	Si + filtr kG5	49,3 ± 1,2	609,0 ± 3,0	81,45 ± 0,81

Podane niepewności parametrów są niepewnościami rozszerzonymi uzyskanymi przez pomnożenie niepewności standardowych przez czynnik $k = 2$. Wzorce te są ogniwami krzemowymi umieszczonymi w obudowie z szybą kwarcową na przedniej powierzchni. Dwa wzorce 0057-2012 i 066-2012 mają dodatkowo filtry KG3 i KG5 odcinające długofalowe promieniowanie dla uzyskania lepszego dopasowania światła symulatora do charakterystyki spektralnej ogniwa.

9.2. NIEDOPASOWANIE SPEKTRALNE

Ponieważ zazwyczaj występują różnice w widmach światła, dla którego ogniwo jest mierzone, i widma referencyjnego AM 1,5 lub w widmach wzorca używanego do kalibracji irradiancji symulatora i mierzonego ogniwa, powinno się określić współczynnik spektralnego niedopasowania (*spectral mismatch factor*). Znając jego wartość, można skorygować poziom irradiancji symulatora słonecznego tak, by zmierzony prąd był taki jak dla widma referencyjnego AM 1,5. W celu wyznaczenia współczynnika spektralnego niedopasowania MM ogniwa zmierzonego pod symulatorem słonecznym, stosuje się wzór [58]:

$$MM = K \times \frac{\int E(\lambda)SR(\lambda)d\lambda}{\int E_{ref}(\lambda)SR(\lambda)d\lambda} \quad (50)$$

gdzie K określone jest przez równanie:

$$K = \frac{\int E_{\text{ref}}(\lambda)SR_{\text{ref}}(\lambda)d\lambda}{\int E(\lambda)SR_{\text{ref}}(\lambda)d\lambda} \quad (51)$$

$E(\lambda)$ jest widmem światła symulatora, a $E_{\text{ref}}(\lambda)$ widmem referencyjnym AM 1,5 G ASTM G-173-03 znormalizowanym do 100 mWcm^{-2} .

Można zauważyć, że całka w liczniku jest to prąd zwarciovowy ogniwa wzorcowego:

$$I_{\text{sc,ref}} = \int E_{\text{ref}}(\lambda)SR_{\text{ref}}(\lambda)d\lambda \quad (52)$$

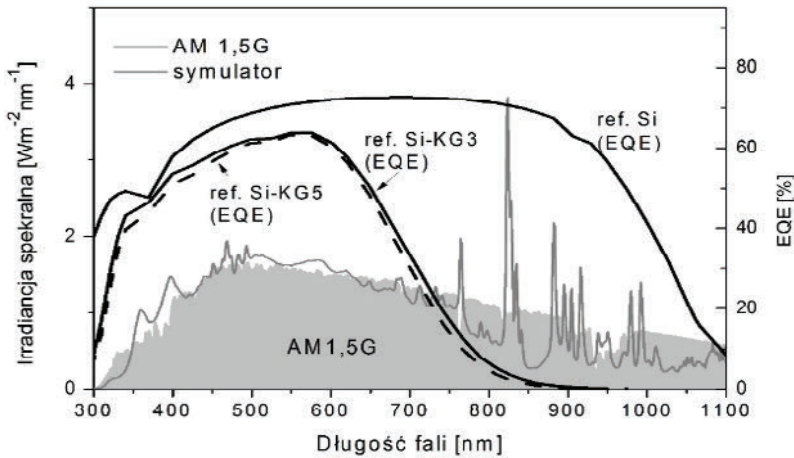
Współczynnik K równy jest stosunkowi prądu zwarciovowego ogniwa wzorcowego dla widma AM 1,5 G do wartości prądu zwarciovowego tego ogniwa dla widma symulatora. Określa on współczynnik, przez który należy pomnożyć zmierzone widmo lampy symulatora, by uzyskać prąd zwarciovowy ogniwa wzorcowego. Pomiar ogniwa testowanego przeprowadza się więc dla widma lampy symulatora $E'(\lambda) = K \times E(\lambda)$. Iloraz prądu zwarciovowego ogniwa testowego zmierzonego dla widma E' do prądu zwarciovowego, jaki byłby zmierzony dla widma wzorcowego AM 1,5 G, określa zatem współczynnik niedopasowania spektralnego MM .

W celu zminimalizowania niedopasowania spektralnego konieczne jest użycie kalibracyjnego ogniwa referencyjnego ze spektralną odpowiedzią $SR_{\text{ref}}(\lambda)$ o charakterystyce odpowiedzi spektralnej możliwie jak najbardziej zbliżonej do ogniwa testowanego $SR(\lambda)$. W tym celu dla większości ogniw ekscytonowych stosuje się krzemowe referencyjne ogniwo z filtrem KG5. Dla ogniw o węższej przerwie energetycznej bardziej są preferowane diody krzemowe bez filtru. Znając współczynnik niedopasowania MM , symulator jest tak skalibrowany, aby prąd zwarciovowy ogniwa wzorcowego $I'_{\text{sc,ref}} = I_{\text{sc,ref}}/MM$.

W laboratorium fotowoltaicznym IMIM PAN pomiar charakterystyk I-V przeprowadzano z użyciem symulatora SS200AAA EM klasy AAA.

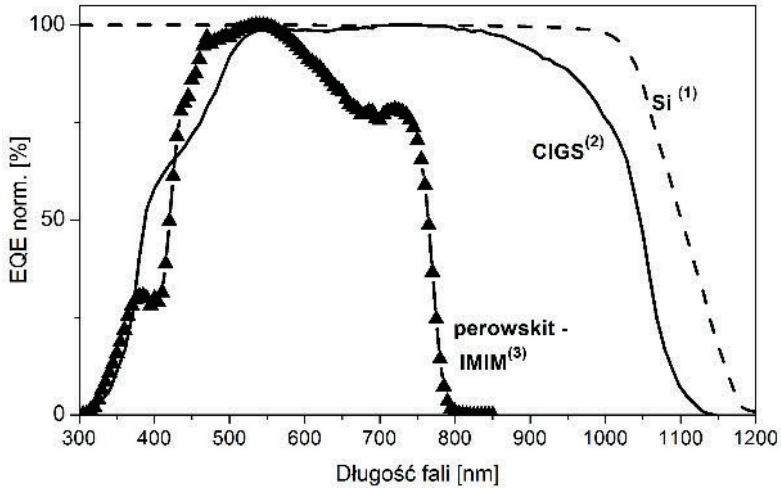
Na rysunku 16 przedstawiona jest irradiancja spektralna światła symulatora, widmo AM 1,5 G zewnętrzne oraz zewnętrzne sprawności kwantowe ogniw wzorcowych.

Na rysunku 17 przedstawiono zewnętrzne sprawności kwantowe w funkcji długości fali światła: zmierzoną sprawność ogniwa perowskitowego wytworzonego w IMIM PAN, symulowaną z użyciem programu PC1D krzemowego ogniwa (o sprawności 24,0%) oraz sprawność ogniwa CIGS na podstawie danych zawartych w publikacjach [60, 61]. Współczynniki niedopasowania obliczono dla podanych ogniw oraz dodatkowo dla ogniwa krzemowego (na podstawie symulacji z użyciem programu PC1D) o sprawności $\eta = 13,8\%$. Wyniki przedstawiono w tabeli 5.



Rys. 16. Natężenie promieniowania (irradiancja) symulatora SS200AAA EM i widmo AM1,5G. Zewnętrzne sprawności kwantowe dla krzemowego ogniwa referencyjnego bez filtru i z filtrami KG3 i KG5

Fig. 16. The intensity of the radiation (irradiance) of the simulator SS200AAA EM and AM1,5G spectrum. The external quantum efficiency for silicon cells without reference filter and with KG3 and KG5 filters



Rys. 17. Znormalizowane widma EQE dla wybranych ogniw:

- (1) ogniwo symulowane z użyciem programu PC1D [59] o sprawności $\eta=24,0\%$,
 (2) ogniwo CIGS $\eta=21,0\%$ [60,61], (3) ogniwo perowskitowe wykonane w IMIM PAN o sprawności $\eta=7\%$

Fig. 17. Normalized EQE spectrum with the selected cells: (1) simulated Si cell using PC1D [59] with $\eta=24,0\%$, (2) CIGS cell with $\eta=21,0\%$ [60, 61], (3) perovskite cell made in IMIM PAN with $\eta=7\%$

Tabela 5. Współczynniki niedopasowania widmowego określone dla pomiaru z użyciem referencyjnego ogniwa krzemowego bez filtru oraz z filtrem KG5 i KG3

Table 5. The spectral mismatch of coefficients set for measurement of a reference silicon cell without and with the filter and KG5 KG3

Typ ogniwa	Ref. Si filtr KG5	Ref. Si filtr KG3	Ref. Si bez filtru
CIGS (21,0%)	0,910	0,912	0,985
Si 13,8 % (sym. PC1D)	0,921	0,924	0,997
Si 24,0 % (sym. PC1D)	0,902	0,904	0,976
Perowskit (IMIM PAN)	0,988	0,990	1,069

9.3. OGNIWA O MAŁEJ POWIERZCHNI

Ogniwa słoneczne opracowywane w laboratoriach mają z reguły małe powierzchnie, często rzędu $0,1 \text{ cm}^2$. Pomiar tego typu ogniw może być obciążony znacznym błędem wynikającym z błędnego określenia powierzchni aktywnej ogniwa. Ponieważ ogniwa te wytwarzane są na płytkach ze szkła, ogniwo może być dodatkowo oświetlone przez światło propagujące wewnątrz płytki szklanej przedostające się od brzegów płytki. Żeby tego uniknąć, brzegi płytki szklanej powinny być dobrze zamaskowane. Pole powierzchni aktywnej ogniwa często przyjmuje się, że jest równe polu powierzchni elektrody metalowej. Takie podejście byłoby słuszne, gdyby światło z symulatora tworzyło wiązkę równoległą lub gdyby ogniwo nie było pokryte szybą. W rzeczywistości nawet w najlepszych symulatorach występuje światło rozproszone. Część światła padającego na szybę może dodatkowo podświetlać ogniwo, w wyniku czego zmierzony prąd zwarciovowy może być znacznie zawyżony. Snaith [62] podaje, że przeszacowanie gęstości prądu zwarciovowego dla ogniwa DSSC z elektrolitem stałym może wynosić około 14%, jeśli ogniwo nie jest maskowane. W przypadku ogniw DSSC z elektrolitem ciekłym zmierzona gęstość prądu zwarciovowego może być nawet dwa razy większa.

9.4. NIEPEWNOŚĆ POMIAROWA

Poprawny pomiar ogniw słonecznych wykonywany jest w laboratoriach akredytowanych takich, jak NREL i ISE-Fraunhofer itp., które wykonują pomiary zgodnie ze standardami ASTM i IEC. Tylko te ogniwa, które mają zmierzone parametry zgodnie z określonymi procedurami mogą być uznane w świecie nauki. Nie wszystkie jednak parametry ogniw, które są publikowane przez różne laboratoria, mają wykonywane badania w laboratoriach akredytowanych, chociażby ze względu na duże koszty takich badań. Ważne jest, żeby badania te były wykonywane w warunkach spełniających pewne wymagania. Stosowanie procedur umożliwia porównywanie ogniw opracowywanych w różnych laboratoriach, co jest konieczne dla dalszego postępu technologii.

W przypadku ogniw nowego rodzaju takich, jak ogniwa organiczne, barwnikowe czy perowskitowe, należących do grupy ogniw ekscytonowych, konieczne jest bardzo rygorystyczne stosowanie się do pewnych procedur pomiarowych. Zwrócił na to uwagę Snaith w swojej publikacji [62], który podał źródła dużych niezgodności w wykonywaniu pomiarów tego typu ogniw. Jakkolwiek pomiar mocy i sprawności ogniwa lub modułu jest stosunkowo prosty i szybki, to jednak trzeba sobie zdawać sprawę, że wyniki te mogą być obciążone dużymi błędami pomiarowymi. Oszacowanie niepewności pomiarowej, z jaką parametry zostały zmierzone, jest kluczowym zadaniem. Do określenia niepewności pomiaru maksymalnej mocy P_{\max} i sprawności η ogniwa lub modułu w warunkach STC trzeba uwzględnić niepewności wszystkich parametrów określających maksymalną moc i sprawność, czyli prądu zwarciovego I_{sc} , napięcia obwodu otwartego V_{oc} , współczynnika wypełnienia FF powierzchni ogniwa A oraz irradancji P_{in} , gdyż P_{\max} i sprawność η określone są równaniami:

$$P_{\max} = I_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF \quad (53)$$

$$\eta = \frac{P_{\max}}{AP_{in}} \quad (54)$$

Niepewności złożone (względne) pomiaru dla P_{\max} i η na podstawie prawa propagacji niepewności [57, 63] mogą być określone na podstawie równań:

$$UP_{\max} = (U(I_{sc})^2 + U(V_{oc})^2 + U(FF)^2)^{\frac{1}{2}} \quad (55)$$

$$U(\eta) = (U(I_{sc})^2 + U(V_{oc})^2 + U(FF)^2 + U(A)^2 + U(P_{in})^2)^{\frac{1}{2}} \quad (56)$$

gdzie $U(I_{sc})$, $U(V_{oc})$, $U(FF)$ są niepewnościami złożonymi (względny) parametrów I_{sc} , V_{oc} i FF , $U(A)$ niepewnością pomiaru powierzchni aktywnej ogniwa (względna), a $U(P_{in})$ niepewnością pomiaru irradancji (względna). Dla obliczenia tzw. rozszerzonej niepewności mnoży się obliczone niepewności przez współczynnik k . Najczęściej $k = 2$, co odpowiada poziomowi ufności 95%.

Źródła niepewności mogą być pogrupowane na [57]:

- elektryczne – niepewności pomiaru prądu, napięcia i prądu sensora irradancji,
- temperaturowe – niepewność pomiaru temperatury wpływa na wynik pomiaru parametrów I_{sc} , V_{oc} ogniwa oraz wzorca,
- optyczne, np. kiedy promieniowanie pada nieprostopadle do ogniwa (modułu),
- związane z niepewnością wzorca; Niepewność prądu zwarciovego określa niepewność wartości natężenia lampy symulatora,
- związane z pomiarem współczynnika FF , np. połączenia, rezystancje kabli, oprogramowanie, docisk sond pomiarowych do elektrod, umiejscowienie sond pomiarowych itp.

Niepewności parametrów I_{sc} i V_{oc} zmierzonych w warunkach STC związane z niepewnością pomiaru temperatury $U(T)$, można określić wzorami [57]:

$$U_T(I_{sc}) = U(\alpha) \cdot \frac{\partial I_{sc}}{\partial \alpha} + U(T) \cdot \frac{\partial I_{sc}}{\partial T} \quad (57)$$

$$U_T(V_{oc}) = U(\beta) \cdot \frac{\partial V_{oc}}{\partial \beta} + U(T) \cdot \frac{\partial V_{oc}}{\partial T} \quad (58)$$

gdzie α i β są względnymi współczynnikami temperaturowymi prądu zwarciovego I_{sc} i napięcia V_{oc} obwodu otwartego (w jednostkach [%]/K).

Do określenia temperaturowej niepewności irradiancji $U(P_{in})$ konieczna jest znajomość temperaturowego współczynnika prądu zwarciovego wzorca (α_{ref}) i jego niepewność ($U(\alpha_{ref})$).

$$U_T(P_{in}) = U(\alpha_{ref}) \cdot \frac{\partial P_{in}}{\partial \alpha_{ref}} + U(T_{ref}) \cdot \frac{\partial P_{in}}{\partial T_{ref}} \quad (59)$$

Wyznaczenie współczynników temperaturowych ogniwa (modułu fotowoltaicznego) oraz niepewności pomiaru temperatury są konieczne do określenia niepewności pomiaru prądu I_{sc} i napięcia V_{oc} związanych z niepewnością pomiaru temperatury wzorca i ogniwa (modułu PV).

Innym czynnikiem wpływającym na niepewność pomiaru parametrów ogniwa (modułu) jest niejednorodność natężenia promieniowania padającego na ogniwo (moduł). Problem ten jest szczególnie istotny dla ogniw o dużych powierzchniach. Dla symulatora klasy A, dla którego niejednorodność jest $< 2\%$, niepewność I_{sc} modułu fotowoltaicznego podana w pracy [57] wynosi $1,6\%$, natomiast dla klasy A^+ (niejednorodność $< 1\%$), niepewność I_{sc} wynosi $0,3-0,4\%$.

Następnym ważnym czynnikiem wpływającym na niepewność pomiaru jest niedopasowanie spektralne widma słonecznego AM 1.5 G i widma symulatora promieniowania słonecznego. Definicja współczynnika niedopasowania spektralnego MM oraz jego obliczenia dla kilku ogniw przedstawione są w rozdz. 9.2. Wartość współczynnika MM zależy od widma lampy $E(\lambda)$, odpowiedzi widmowej wzorca $SR_{ref}(\lambda)$ i mierzonego ogniwa $SR(\lambda)$. Niepewności wszystkich tych wielkości są niepewnościami złożonymi składającymi się z niepewności pomiaru widm, niepewności związanych z niepowtarzalnością pomiaru i niejednorodnością rozkładu promieniowania [57].

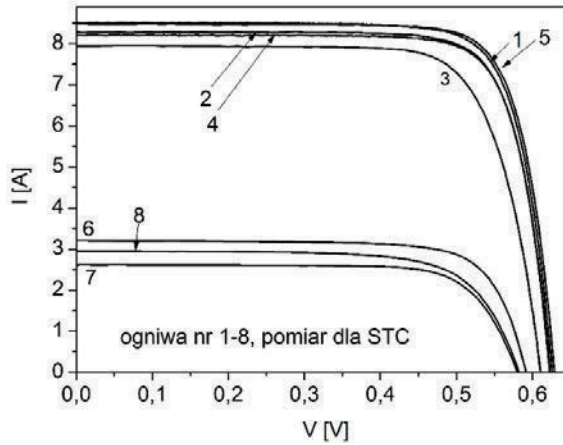
10. POMIAR PARAMETRÓW ELEKTRYCZNYCH OGNIW

10.1. OGNIWA KRZEMOWE

Pomiar charakterystyk I-V krzemowych ogniw słonecznych przeprowadzono z użyciem symulatora promieniowania słonecznego SS200AAA EM produkcji Photo-

Emission Tech., zintegrowanego z systemem pomiarowym SS I-V CT-02 produkcji PV Test Solutions z Wrocławia.

Na rysunku 18 przedstawiono jasne charakterystyki I-V wszystkich badanych krzemowych ogniw. Ogniw 1–5 są to wysokiej sprawności ogniw komercyjnej o powierzchni 243 cm^2 , natomiast ogniw 6–8 są to ogniw wytworzone w Laboratorium Fotowoltaicznym IMIM PAN w Kozach o powierzchni 100 cm^2 . Na rysunku 19 przedstawione są ciemne charakterystyki tych ogniw.



Rys. 18. Jasne charakterystyki krzemowych ogniw słonecznych zmierzone w warunkach STC

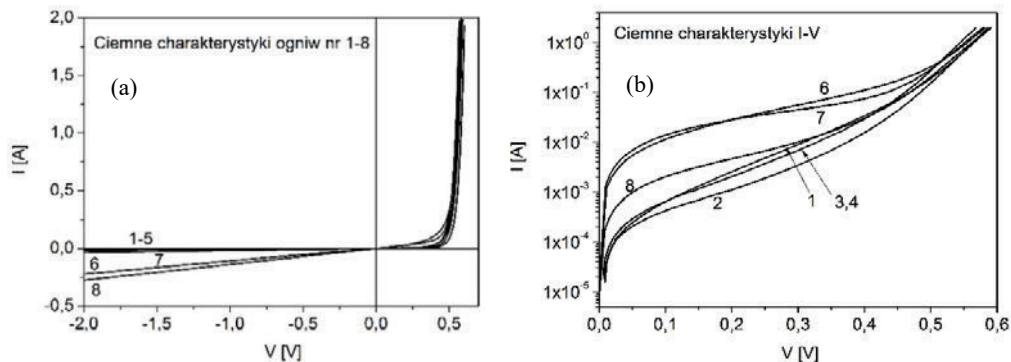
Fig. 18. Light I-V characteristics of silicon solar cells measured under STC conditions

Badane ogniw obejmują duży zakres sprawności 12,07–16,9%, napięć V_{oc} (584–626 mV), współczynnika FF (0,696–0,788) i gęstości prądów zwarciovych (29,7–34,5 mA/cm²) (tab. 6).

Tabela 6. Średnie wartości parametrów ogniw dla warunków STC

Table 6. Average values of cells for STC conditions

Nr	Krzem	A [cm ²]	I_{sc} [mA]	J_{sc} [mA/cm ²]	V_{oc} [mV]	FF –	η [%]
1	mc-Si	243,36	8390 ± 162	34,5 ± 0,7	626 ± 2	78,2 ± 0,5	16,91 ± 0,64
2	mc-Si	243,36	8289 ± 160	34,1 ± 0,7	623 ± 2	78,5 ± 0,5	16,74 ± 0,64
3	mc-Si	243,36	7947 ± 153	32,7 ± 0,6	609 ± 2	75,6 ± 0,5	15,12 ± 0,60
4	mc-Si	243,36	8189 ± 158	33,7 ± 0,6	623 ± 2	78,8 ± 0,5	16,57 ± 0,68
5	Cz-Si	241	7945 ± 153	33,0 ± 0,6	610 ± 2	75,6 ± 0,5	15,12 ± 0,62
6	Cz-Si	100	3211 ± 62	32,1 ± 0,6	591 ± 2	75,5 ± 0,5	14,33 ± 0,58
7	mc-Si	100	2627 ± 51	26,3 ± 0,5	580 ± 2	76,6 ± 0,5	11,67 ± 0,48
8	mc-Si	100	2971 ± 57	29,7 ± 0,6	584 ± 2	69,6 ± 0,5	12,07 ± 0,50



Rys. 19. Ciemne charakterystyki krzemowych ogniw słonecznych w skali liniowej (a) i logarytmicznej (b)

Fig. 19. Dark I-V characteristics of silicon solar cells plotted on linear (a) and log. scales (b)

Z rysunku 19a przedstawiającego ciemne charakterystyki w skali liniowej wynika, że ogniwa 6 i 8 mają duże wartości ciemnych prądów dla ogniwa spolaryzowanego w kierunku zaporowym. Wynika stąd, że ich rezystancja równoległa R_{sh} jest bardzo mała, innymi słowami ogniwa te mają duże wartości prądów upływu.

Z rysunku 19b przedstawiającego ciemne charakterystyki, których oś I jest w skali logarytmicznej, wynika z kolei, że charakterystyki w części liniowej mają różne nachylenie. Współczynnik nachylenia określa parametr jakości diody n w modelu jednodiodowym. Widać, że charakterystyki ogniw 6, 7, 8 są bardziej nachylone od pozostałych, z czego wynika, że mają większe wartości parametrów jakości diody n .

Na podstawie ciemnych charakterystyk można określić wszystkie parametry diody, ale dla warunków ogniwa nieoświetlonego. W pracy określano parametry diody jedynie na podstawie jasnych charakterystyk zmierzonych w warunkach STC.

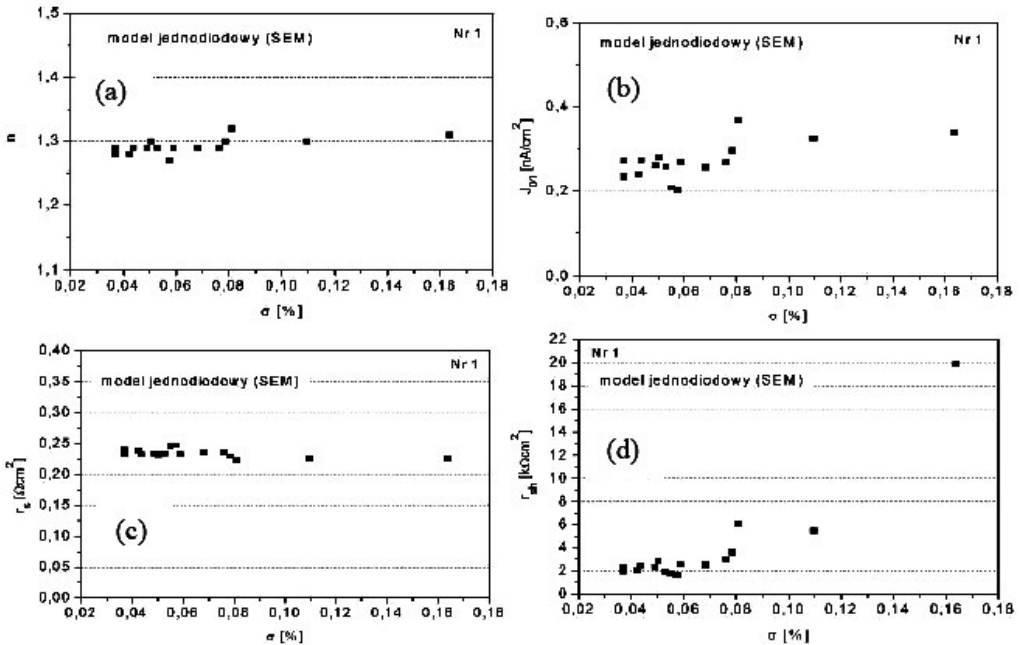
Parametry elektryczne uzyskane metodą dopasowania jasnych charakterystyk I-V modelami diodowymi ogniwa

Parametry diodowe ogniw określano z użyciem programu stosowanego do pomiaru ogniw, który ma możliwość przeprowadzania analizowania charakterystyk I-V metodą ich dopasowania za pomocą trzech teoretycznych modeli ogniwa. Zaletą programu analizującego jest użycie 17 funkcji wagowych, od których zależy w dużym stopniu dokładność dopasowania. Program ten podaje wartości parametrów występujących w modelach diodowych oraz parametry określające różnicę między wartościami teoretycznymi uzyskanymi na drodze dopasowania a wartościami zmierzonymi dla prądu zwarcowego ε_{jsc} , napięcia obwodu otwartego ε_{Voc} , współczynnika wypełnienia ε_{FF} , sprawności ε_{eff} , prądu, napięcia i mocy w punkcie maksymalnej mocy ε_{jm} , ε_{Vm}

i ε_{PM} . Dla opisu dokładności aproksymacji wprowadzono parametr σ zdefiniowany następująco:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\varepsilon_{j_{sc}}^2 + \varepsilon_{V_{oc}}^2 + \varepsilon_{P_m}^2}{3}} \quad (60)$$

Dzięki wprowadzeniu parametru σ można określić najlepsze dopasowania. Na rysunku 20 przedstawiono uzyskane parametry: n , r_s , r_{sh} , j_0 dla wszystkich funkcji wagowych w funkcji parametru σ dla ogniwa nr 1. Wynika z niego bardzo mały rozrzut uzyskanych parametrów dla różnych wartości parametru σ , z wyjątkiem tylko jednego dopasowania, dla którego rezystancja równoległa r_{sh} wynosiła 20 k Ω cm dla parametru σ wynoszącego około 0,16%. Jako najlepsze wartości parametrów dopasowania przyjęto parametry dla najmniejszych wartości parametru σ . Parametry te dla trzech najlepszych dopasowań dla trzech modeli dla ogniwa nr 1 przedstawiono w tabeli 7. W tabeli 8 zebrano z kolei wszystkie parametry uzyskane z dopasowania dla modelu jednodiodowego dla wszystkich ogniw.



Rys. 20. Parametry w modelu jednodiodowym (SEM) ogniwa krzemowego nr 1 (tab. 6) uzyskane metodą dopasowania charakterystyki I-V z użyciem programu analizującego charakterystyki (PV Test Solutions) w zależności od parametru σ

Fig. 20. The one-diode model (SEM) parameters of the Si solar cell no. 1 (Table 6) obtained by fitting I-V characteristics using the analyzing procedure of the program (PV Test Solutions) in the function of σ parameter

Tabela 7. Parametry diodowe ogniwa krzemowego nr 1 (tab. 6) uzyskane metodą dopasowania charakterystyki I-V z użyciem programu analizującego charakterystyki (PV Test Solutions) trzech najlepszych dopasowań dla trzech modeli ogniwa. Oznaczenia: SD standardowe odchylenie, f.w. – numer funkcji wagowej w programie PV Test Solutions

Table 7. Diode parameters of silicon solar cell no. 1 (Table 6) obtained by fitting the characteristics of I-V using the analysing procedure of the measuring programme (PV Test Solutions) for the three best matches. Symbols: SD standard deviation, f.w. – the number of the weighting function in the program

(a) Model SEM

SD	funkcja wagowa	r_{sh}	r_s	J_0	n	ε_{Isc}	ε_{Voc}	ε_{Pm}	σ
	–	$k\Omega\cdot cm^2$	$\Omega\cdot cm^2$	nA/cm^2	–	%			
$1,8 \times 10^{-9}$	8	1,99	0,23	0,21	1,29	-0,03	0,01	0,23	0,055
$3,7 \times 10^{-7}$	9	1,94	0,23	0,21	1,29	-0,02	0,01	0,09	0,053
$1,2 \times 10^{-6}$	13	1,87	0,23	0,24	1,29	0,06	0,01	0,07	0,053

(b) Model DEM

SD	funkcja wagowa	r_{sh}	r_s	J_{01}	J_{02}	ε_{Isc}	ε_{Voc}	ε_{Pm}	σ
	–	$k\Omega\cdot cm^2$	$\Omega\cdot cm^2$	fA/cm^2	nA/cm^2	%			
$1,7 \times 10^{-9}$	6	10,34	0,34	711,8	46,59	-0,07	-0,03	-0,24	0,146
$3,7 \times 10^{-7}$	9	10,14	0,30	710,7	46,77	-0,07	-0,03	-0,25	0,152
$1,2 \times 10^{-6}$	15	7,19	0,35	721,7	44,54	-0,07	-0,02	-0,2	0,123

(c) Model VDEM

SD	funkcja wagowa	r_{sh}	r_s	J_{01}	J_{02}	n_2	ε_{Isc}	ε_{Voc}	ε_{Pm}	σ
	–	$k\Omega\cdot cm^2$	$\Omega\cdot cm^2$	fA/cm^2	nA/cm^2	–	%			
$9,3 \times 10^{-5}$	6	6,27	0,33	658	17,67	1,83	-0,08	-0,02	-0,18	0,114
$3,5 \times 10^{-5}$	10	4,96	0,32	650	14,92	1,80	-0,07	-0,02	-0,18	0,112
$4,6 \times 10^{-5}$	15	5,44	0,34	688	23,29	1,88	-0,07	-0,02	-0,16	0,101

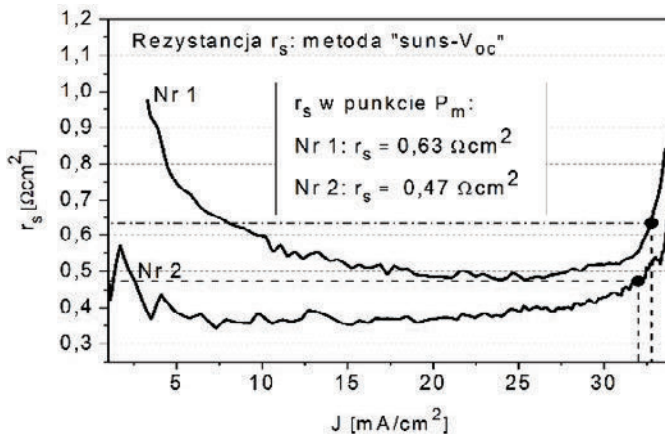
Tabela 8. Parametry diodowe wszystkich ogniw dla najlepszych dopasowań dla modelu SEM

Table 8. Diode parameters of all solar for the best fitting by SEM model

Nr	SD	f. w.	r_{sh}	r_s	J_0	n	ε_{Isc}	ε_{Voc}	ε_{Pm}	ε_{FF}	σ
–		–	$k\Omega\cdot cm^2$	$\Omega\cdot cm^2$	nA/cm^2	–	%				
1	$3,7 \times 10^{-7}$	9	1,94	0,23	0,21	1,29	-0,02	0,01	0,09	0,11	0,053
2	$9,9 \times 10^{-11}$	14	6,1	0,21	0,27	1,30	-0,01	-0,01	-0,15	-0,13	0,075
3	$2,7 \times 10^{-7}$	15	11,0	0,36	9,83	1,58	0,03	0,07	-0,56	-0,46	0,326
4	$2,8 \times 10^{-10}$	15	4,82	0,22	0,13	1,25	-0,06	0,0	-0,01	0,05	0,036
5	$7,0 \times 10^{-11}$	15	5,97	0,25	0,09	1,24	-0,04	0,00	-0,11	-0,07	0,068
6	$1,7 \times 10^{-9}$	15	0,89	0,08	4,24	1,46	-0,02	0,04	0,24	0,21	0,141
7	$8,2 \times 10^{-10}$	15	2,27	0,66	1,38	1,35	-0,06	-0,01	-0,13	-0,06	0,083
8	$2,2 \times 10^{-9}$	15	0,88	0,20	132,0	1,84	-0,09	0,06	0,16	0,19	0,111

Rezystancja szeregową obliczona na podstawie charakterystyk $J_{sc}-V_{oc}$

Charakterystyki $J_{sc}-V_{oc}$, uzyskano z użyciem stanowiska „suns- V_{oc} ”, którym mierzone jest napięcie V_{oc} w funkcji malejącego natężenia światła w czasie jednego błysku lampy flesztowej. Po założeniu, że J_{sc} jest proporcjonalne do natężenia światła otrzymuje się charakterystykę J_{sc} w funkcji V_{oc} , reprezentującą idealną charakterystykę dla ogniwa z rezystancją $r_s = 0$ (rys. 9). Z porównania tej charakterystyki z charakterystyką $J-V$ ogniwa otrzymuje się rezystancję szeregową w funkcji napięcia lub prądu, co przedstawiono na rys. 21 dla ogniw nr 1 i 2 (tab. 6).



Rys. 21. Rezystancja szeregową w funkcji prądu określona z wykresów na rys. 9 dla ogniw krzemowych nr 1 i 2. Zaznaczony punkt na krzywej odpowiada gęstości prądu J_m w punkcie maksymalnej mocy. Wartość rezystancji podana dla punktu maksymalnej mocy Fig. 21. Series resistance as a function of the current determined from the graph in Fig. 9 for silicon cells no. 1 and no. 2. The selected point on the curve represents the current density J_m on the maximum power point. The resistance value given for the maximum power point

Określona rezystancja szeregową ogniwa nr 1 dla punktu maksymalnej mocy wynosi $r_s = 0,63 \Omega \text{ cm}^2$. Jest to znacznie większa wartość niż uzyskano metodą dopasowania (tab. 7) z użyciem modelu SEM ($0,23 \Omega \text{ cm}^2$). Mniejszą różnicę uzyskano dla modelu DEM ($0,35 \Omega \text{ cm}^2$) i VDEM ($0,34 \Omega \text{ cm}^2$).

Porównanie pomiarów rezystancji różnymi metodami

W tabeli 9 przedstawiono rezystancje szeregową badanych ogniw z użyciem różnych metod uzyskane na podstawie pomiaru dwóch charakterystyk I-V dla dwóch różnych natężeń promieniowania. Z tabeli 9 wynika, że rezystancje szeregową metodą „suns- V_{oc} ” są zbliżone do tych wartości. Rezystancje uzyskane metodą dopasowania są natomiast ponad dwa razy mniejsze dla modelu jednodiodowego. Bardziej zbliżone są wartości rezystancji uzyskane w modelu dwudiodowym (DEM), np. dla ogniwa

nr 7 rezystancje te są sobie równe. W tabeli przedstawiono również dynamiczne rezystancje szeregowe r_{s0} . Powinny one być większe od rezystancji szeregowej. W przypadku ogniwa nr 8, dla którego rezystancja jest ekstremalnie duża, wartość rezystancji uzyskanej metodą pomiaru charakterystyk dla dwóch różnych intensywności światła jest większa o $0,05 \Omega \text{ cm}^2$ od r_{s0} .

Tabela 9. Porównanie rezystancji szeregowej zmierzonej różnymi metodami
Table 9. Comparison of series resistance measured by various methods

Nr	r_s (SEM) [$\Omega \text{ cm}^2$]	r_s (DEM) [$\Omega \text{ cm}^2$]	r_s (VDEM) [$\Omega \text{ cm}^2$]	r_s ($suns-V_{oc}$) [$\Omega \text{ cm}^2$]	r_s (dla dwóch inten. światła) [$\Omega \text{ cm}^2$]	r_{s0} [$\Omega \text{ cm}^2$]
1	0,23	0,35	0,34	0,63	0,54	1,14
2	0,21	0,34	0,30	0,47	0,62	1,18
3	0,36	0,60	0,36	0,98	0,70	1,41
4	0,22	0,33	0,30	0,56	0,64	1,26
5	0,25	0,36	0,32	0,49	0,61	1,30
6	0,08	0,27	0,34	0,52	0,75	1,20
7	0,66	0,87	0,74	0,98	0,87	1,63
8	0,20	0,50	0,66	2,00	2,15	2,10

10.2. OGNIWA PEROWSKITOWE

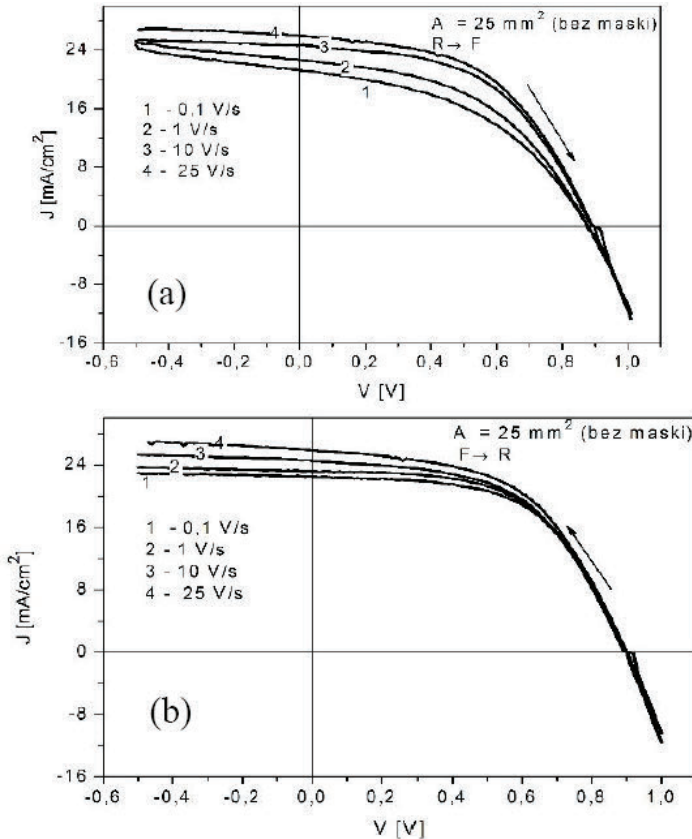
Charakterystyki zmierzono z użyciem symulatora słonecznego *SS200AAA EM* produkcji Photo-Emission Tech. zintegrowanego z systemem pomiarowym K24XXCell Tester wykonanym przez firmę PV Test Solutions z Wrocławia. W skład tego systemu wchodzi miernik napięciowo-prądowy Keithley 2401.

Na rysunkach 22 i 23 przedstawiono charakterystyki I-V zmierzone dla warunków STC ogniwa perowskitowego wykonanego w IMIM PAN dla różnych warunków dynamicznych pomiaru. Prędkości skanowania zmieniano w zakresie 0,2–25 V/s. Pomiaru wykonywano, zmieniając mierzone napięcie w kierunku wzrastających wartości (od I_{sc} do V_{oc} , kierunek $R \rightarrow F$) i w kierunku malejących wartości napięć (od V_{oc} do I_{sc} , kierunek $F \rightarrow R$). Kierunki skanowania zaznaczone są strzałkami na rysunkach 22 i 23.

Badane ogniwo ma standardową budowę przedstawioną na rys. 13. Podłożem jest szkło grubości 2,2 mm z naniesioną przezroczystą warstwą przewodzącego tlenku cyny domieszkowanego fluorem FTO. Materiałem absorbującym światło jest perowskit $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$, wypełniający warstwę mezoporowatego tlenku tytanu.

Z rysunków 22 i 23 wynika, że charakterystyka I-V zależy zarówno od prędkości skanowania, jak również od kierunku zmian jego wartości. Dla małych prędkości ska-

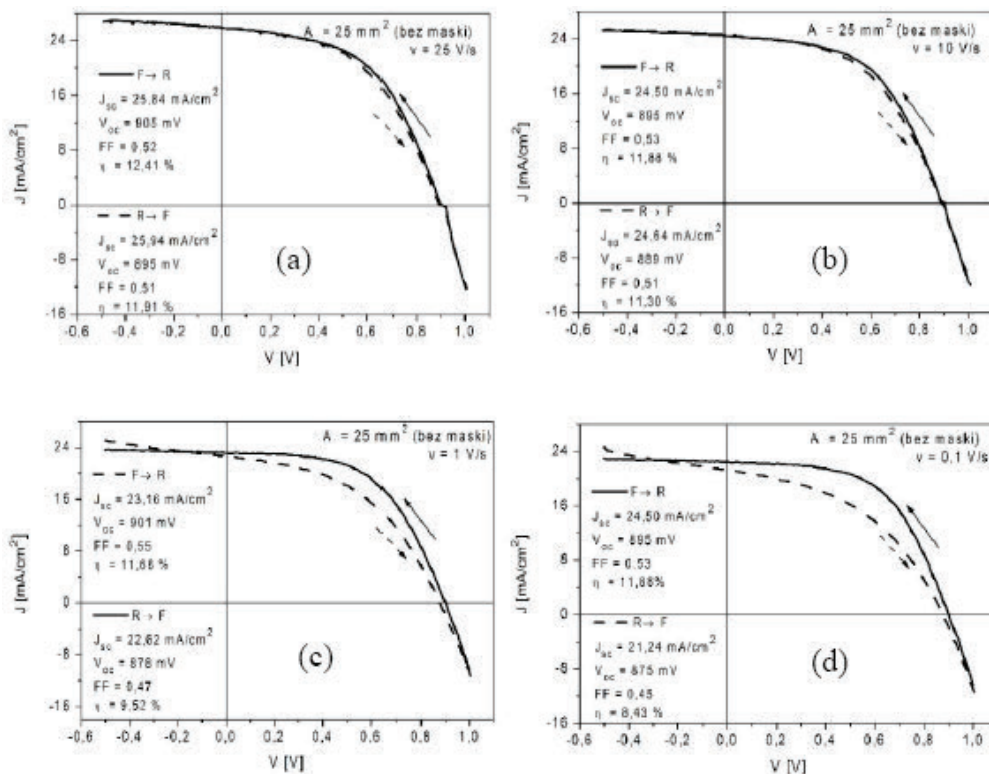
nowania (500 mV/s) występuje duża różnica pomiędzy dwoma charakterystykami zmierzonymi dla dwóch kierunków skanowania. Efekt ten zanika dla bardzo dużej prędkości skanowania (25 V/s). Zależność charakterystyki I-V od kierunku skanowania jest typowa dla tego typu ogniw. Właściwość ta, zwana histerezą charakterystyki I-V, opisana jest w wielu publikacjach, między innymi w [64–74]. Pomimo bardzo intensywnych badań, mechanizm powstawania histerezy nie jest jeszcze w pełni wyjaśniony.



Rys. 22. Charakterystyki I-V ogniwa perowskitowego dla czterech prędkości skanowania (0,1, 1, 10, 25 V/s) (a). Skanowanie w czasie pomiaru w kierunku rosnących napięć: ($R \rightarrow F$) lub w kierunku malejących napięć ($F \rightarrow R$) (b)

Fig. 22. The I-V characteristics of the perovskite solar cell for four scan rate (0,1, 1, 10, 25 V/s).

The scan direction “revers-forward”:
 $R \rightarrow F$ (a) and forward-revers $F \rightarrow R$ (b)



Rys. 23. Charakterystyki J-V ogniwa perowskitowego (41,8) dla obu kierunków skanowania dla prędkości skanowania 25 V/s (a), 1V/s (b) i 0,5 V/s (c). Niepewności parametrów nie określano ze względu na pomiar bez maski i nieokreśloność pola powierzchni ogniwa (d)

Fig. 23. The I-V characteristics of perovskite solar cell (41.8) for two scan direction for 25 V/s (a), 1V/s (b) and 0.5 V/s (c) scan rate. Uncertainty of results is not specified due to the measurement without the mask and the lack of defined surface area (d)

Najczęściej histerezę charakterystyk I-V próbuje się wytłumaczyć według kilku procesów związanych z pułapkowaniem nośników ładunku elektrycznego (elektronów i dziur), wolną migracją jonów, jak i z ferroelektrycznym zachowaniem perowskitów w nanoskali.

Zostało pokazane, że nie tylko prędkość skanowania i jego kierunek są istotne dla powstania efektu histerezy. Równie ważna jest historia próbki przed skanowaniem, np. wartość napięcia polaryzującego lub moc promieniowania oświetlającego ogniwo w punkcie pracy V_{oc} lub I_{sc} i czas, w którym to ogniwo pozostawało w tym stanie [67].

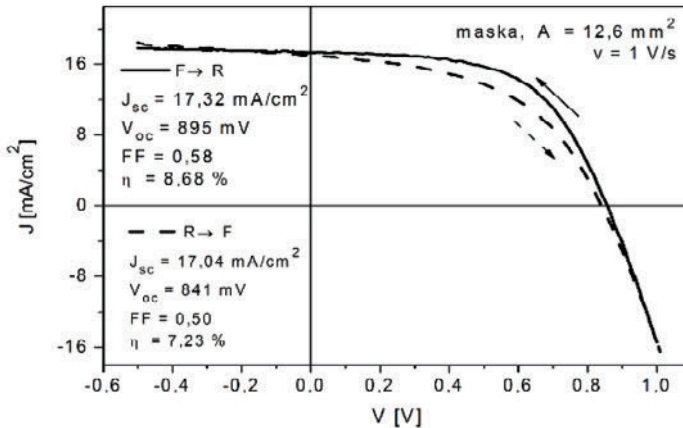
Opierając się na numerycznym modelowaniu [74], Snaith i wsp. pokazali, że obserwowane efekty związane z histerezą mogą być związane tylko w przypadku równoczesnego występowania transportu jonów w objętości perowskitu oraz pułpkowania nośników ładunku elektrycznego zachodzącego głównie w pobliżu między-

powierzchni rozdzielających perowskit od warstwy HTM (przewodzącej dziury) lub ETM (przewodzącej elektrony).

Na podstawie zmierzonych charakterystyk I-V przedstawionych na rys. 22 i 23 można stwierdzić, że szybki pomiar (prędkość skanowania 25 V/s) nie powoduje powstania histerezy, ponieważ jony nie nadążają za szybką zmianą napięcia. Pomiar przy tak dużej prędkości skanowania nie jest jednak odpowiedni, gdyż właściwy pomiar powinien odbywać się w stanie prawie ustalonym, gdyż tylko taki pomiar może dać informację, jaką można uzyskać z ogniwa w naturalnych warunkach pracy.

Charakterystyki na rys. 22 i 23 nie mają dokładnie określonych parametrów prądu zwarcioowego i sprawności, ponieważ dokładny pomiar takich ogniw wymaga użycia maski określającej powierzchnię aktywną ogniwa. Ponieważ ogniwa mają na górnej powierzchni grubą szybę (2,2 mm), uzyskiwane wartości tych parametrów są znacznie zawyżone.

Na rysunku 24 przedstawiono charakterystykę I-V zmierzoną z użyciem maski i dla porównania bez maski. Powierzchnia aktywna równa polu powierzchni otworu w masce (aperturze) wynosiła 12,6 mm². Z rysunku widać, że gęstość prądu zwarcioowego ogniwa z maską jest o ok. 24% mniejsza niż dla ogniwa zmierzonego bez maski.



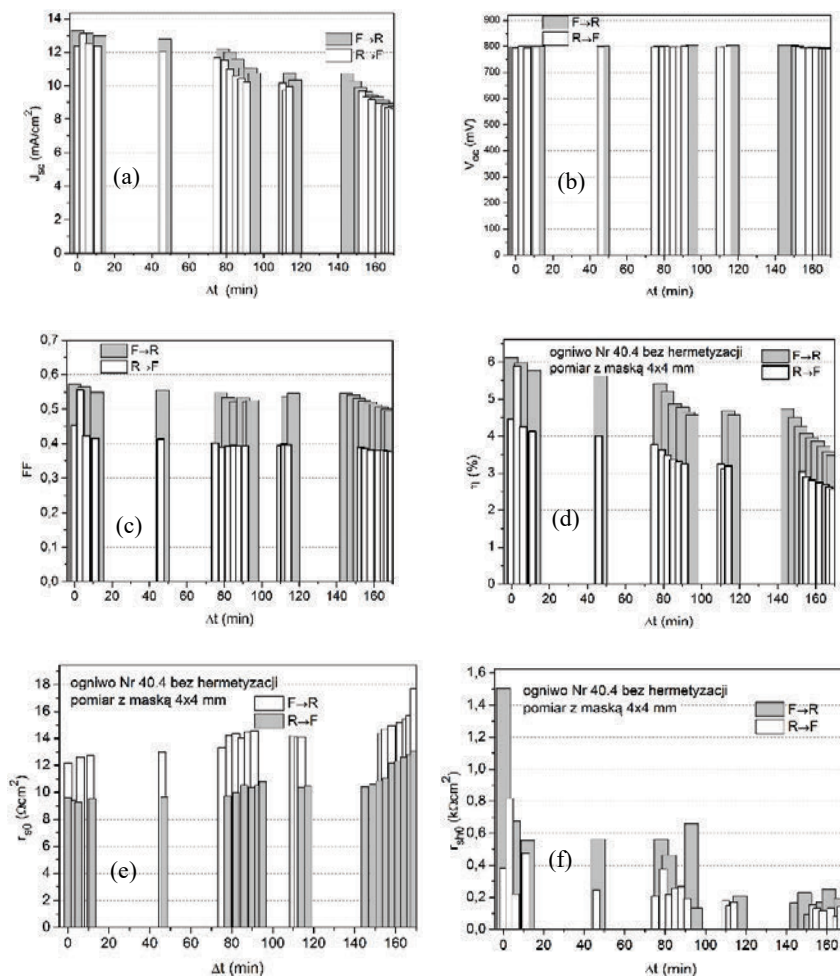
Rys. 24. Charakterystyka J-V ogniwa perowskitowego (41.8) zmierzona z użyciem maski
Fig. 24. The J-V characteristics of the perovskite solar cell (41.8), measured with the mask

Tabela 10. Parametry słonecznego ogniwa perowskitowego
Table 10. Parameters perovskite solar cell

Nr	Skan	A [cm ²]	I_{sc} [mA]	J_{sc} [mA/cm ²]	V_{oc} [mV]	FF [%]	η [%]
41.8	$R \rightarrow F$	$0,126 \pm 0,007$	$2,15 \pm 0,05$	$17,0 \pm 1,0$	841 ± 2	50 ± 2	$7,2 \pm 0,6$
41.8	$F \rightarrow R$	$0,126 \pm 0,007$	$2,18 \pm 0,05$	$17,3 \pm 1,0$	895 ± 2	58 ± 2	$8,7 \pm 0,6$

Stabilność parametrów ogniwi perowskitowych

Ogniwo perowskitowe (nr 40.4) mierzono wielokrotnie w celu sprawdzenia stabilności wytwarzanych ogniwi perowskitowych. Na rysunku 25 przedstawione są wyniki zmierzonych wartości gęstości prądu zwarciego J_{sc} , napięcia obwodu otwartego V_{oc} , współczynnika wypełnienia FF , sprawności η oraz dodatkowo dynamicznych rezystancji szeregowej i równoległej. Widać, że wartości prądu zwarciego zmniejszają



Rys. 25. Stabilność parametrów J_{sc} , V_{oc} , FF , η i r_{so} , r_{sho} ogniwa mierzonego bez odstępów czasowych i w odstępach czasowych ok. 20 min

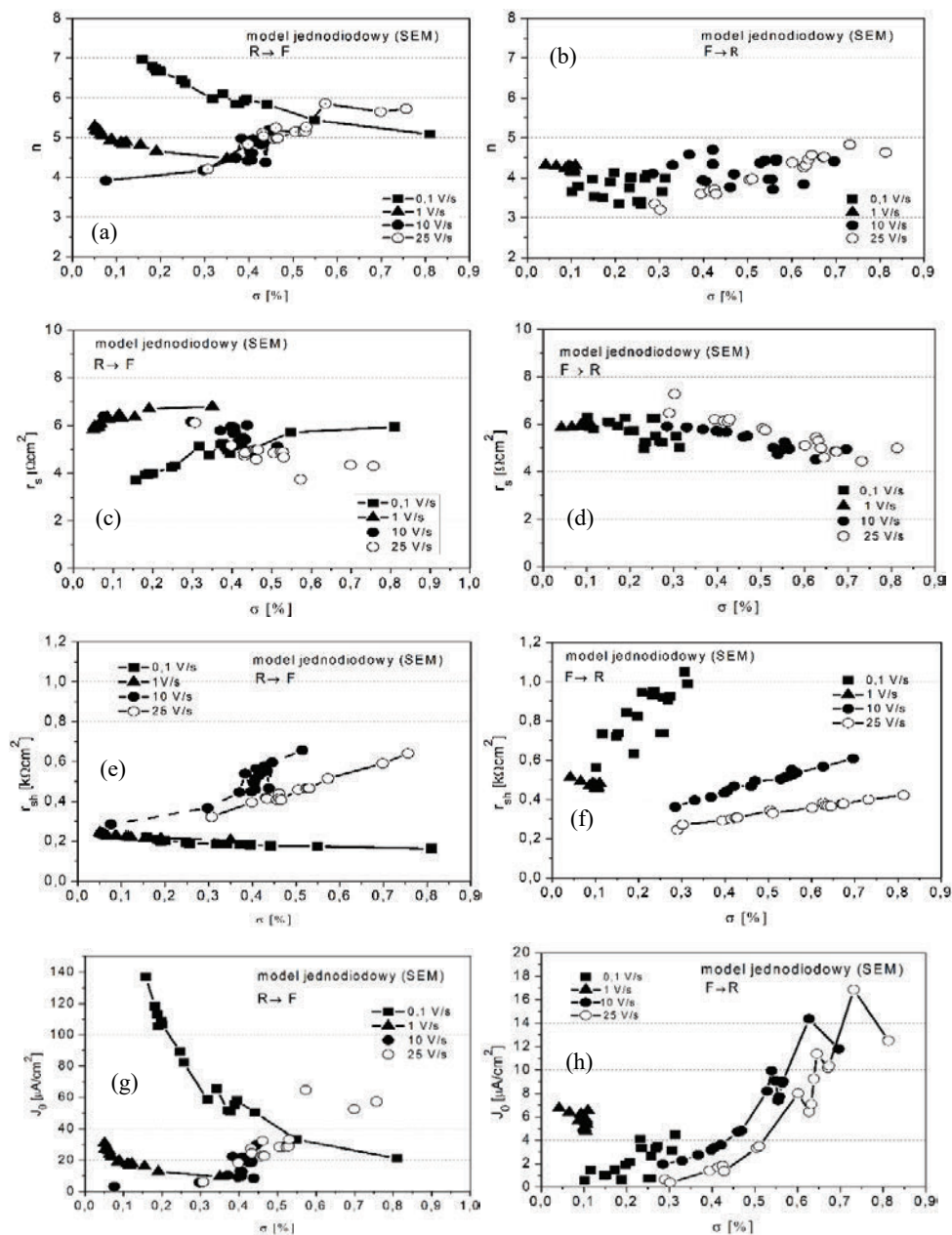
Fig. 25. Stability of the parameters J_{sc} , V_{oc} , FF , η and r_{so} , r_{sho} of the solar cell measured without and with about 20 min intervals

szają się po każdym pomiarze i nie wracają do swoich pierwotnych wartości po pozostawieniu ogniwa przez pewien okres ok. 20 min bez oświetlania. Napięcie V_{oc} wykazuje się znaczną stabilnością, mały spadek wartości dla dłuższej 5 serii związany jest ze wzrostem temperatury ogniwa. Współczynniki FF również wykazują zmniejszenie swoich wartości. W jeszcze większym stopniu zmniejszają się sprawności ogniwa od 6,1–3,5% dla kierunku $F \rightarrow R$ i 4,5–2,5% dla kierunku $R \rightarrow F$. Interesujące jest, że ogniwo mierzone w kierunku $R \rightarrow F$ po raz drugi w pierwszej serii ma większą wartość η (oraz J_{sc} i FF), która jest zbliżona do wartości η dla skanowania w kierunku $F \rightarrow R$. Takie zachowanie ogniw perowskitowych związane jest prawdopodobnie z transportem jonów oraz z efektami pojemnościowymi. Z rysunku wynika również, że dynamiczna rezystancja szeregową zwiększa się po każdym kolejnym pomiarze, natomiast rezystancja równoległa maleje, w większym stopniu dla ogniw mierzonych w kierunku $F \rightarrow R$.

Parametry elektryczne uzyskane metodą dopasowania jasnych charakterystyk I-V modelami diodowymi ogniwa

Charakterystyki I-V ogniw perowskitowych zależą od prędkości i od kierunku skanowania. W celu zbadania jak zmieniają się również parametry diodowe charakterystyki te poddano analizie z użyciem procedury wchodzącej w skład programu komputerowego (PV Test Solutions) stosowanego do pomiaru ogniw. W procedurze tej dopasowuje się jeden z trzech modeli diodowych ogniwa do charakterystyki I-V. Dla uzyskania jak najlepszego dopasowania używano wszystkich dostępnych w procedurze funkcji wagowych.

Na rysunku 26 przedstawione są wykresy parametrów diodowych ogniwa perowskitowego uzyskane z dopasowania modelem jednodiodowym jasnej charakterystyki I-V (rys. 24), zmierzonej dla dwóch kierunków skanowania i dla czterech prędkości skanowania 0,1 V/s, 1 V/s, 10 V/s i 25 V/s. Z rysunku wynika, że wszystkie parametry diody również zależą od prędkości i kierunku skanowania. Współczynnik jakości diody n dla kierunku skanowania $R \rightarrow F$ przyjmuje największe wartości dla małej prędkości skanowania 0,1 V/s i wynosi około 7. Dla dużej prędkości 10 V/s i 25 V/s przyjmuje wartość około 4. Natomiast dla kierunku skanowania $F \rightarrow R$ wielkości parametru n przyjmują wartości z zakresu 3–4,5. Wartości rezystancji szeregowej są z kolei mniejsze dla dużych prędkości skanowania (ok. $4 \Omega\text{cm}^2$) niż dla małej prędkości skanowania ($6 \Omega\text{cm}^2$). Wartości rezystancji równoległej są większe dla kierunku skanowania $F \rightarrow R$, a wartości ciemnych prądów nasycenia J_0 są mniejsze, szczególnie dla dużych prędkości skanowania.



Rys. 26. Parametry diodowe ogniwa perowskitowego (41.8) wytworzonego w IMIM PAN uzyskane metodą dopasowania charakterystyki I-V z użyciem procedury analizującej charakterystyki programu pomiarowego (PV Test Solutions) w zależności od parametru σ

Fig. 26. The diode parameters of the perovskite cell obtained by fitting the I-V a characteristics using the analyzing procedure of the measuring program (PV Test Solutions) in the function of σ parameter

W tabeli 11 przedstawiono parametry diodowe uzyskane do dopasowania z użyciem trzech modeli dla najlepszych dopasowań (najmniejsza wartość σ) charakterystyki I-V ogniwa perowskitowego (41.8) oraz dwóch kierunków skanowania i prędkości 1 V/s. Spośród tych trzech modeli model VDEM daje najlepsze dopasowania. Model DEM daje najgorsze dopasowania ($\sigma > 1\%$), a wartości gęstości prądów nasycenia mają nierealnie duże wartości (powyżej 7 A/cm²), wobec tego model ten nie nadaje się dla ogniw perowskitowych.

Tabela 11. Parametry diodowe ogniwa perowskitowego (41.8) dla trzech modeli
Table 11. Diode parameters of the perovskite solar cell (41.8) for three models

(a) Model SEM

Skany	SD	f.w.	r_{sh}	r_s	J_0	n	ϵ_{Isc}	ϵ_{Voc}	ϵ_{Pm}	σ
		–	$\Omega \cdot \text{cm}^2$	$\Omega \cdot \text{cm}^2$	$\mu\text{A}/\text{cm}^2$	–	%			
$R \rightarrow F$	$7,4 \times 10^{-7}$	13	245	5,8	31,0	5,29	0,03	0,08	–0,02	0,05
$F \rightarrow R$	$1,9 \times 10^{-7}$	13	361	5,9	2,0	3,71	–0,15	–0,21	–0,42	0,28

(b) Model DEM

Skany	SD	f.w.	r_{sh}	r_s	J_{01}	J_{02}	ϵ_{Isc}	ϵ_{Voc}	ϵ_{Pm}	σ
		–	$\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$	$\Omega \cdot \text{cm}^2$	A/cm^2	pA/cm^2	%			
$R \rightarrow F$	$1,1 \times 10^{-8}$	15	175	13,4	8,8	602	–0,70	–0,02	1,58	1,18
$F \rightarrow R$	$2,8 \times 10^{-10}$	6	175	12,7	7,6	735	–0,75	–0,02	2,19	1,33

(c) Model VDEM

Skany	SD	f.w.	r_{sh}	r_s	J_{01}	J_{02}	n_2	ϵ_{Isc}	ϵ_{Voc}	ϵ_{Pm}	σ
		–	$\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$	$\Omega \cdot \text{cm}^2$	$\times 10^{-18}$ A/cm^2	$\mu\text{A}/\text{cm}^2$	–	%			
$R \rightarrow F$	$1,4 \times 10^{-6}$	10	215	8,8	4,7	6,8	4,39	–0,04	0,04	–0,02	0,03
$F \rightarrow R$	$2,8 \times 10^{-6}$	0	413	7,6	2,1	2,1	3,84	0,15	0,01	–0,03	0,09

W wyniku analizy ogniwa perowskitowego modelem dwudiodowym VDEM ($n_1 = 1$ i n_2 zmienne) uzyskuje się J_{01} bardzo małe, rzędu 10^{-18} A/cm², model więc sprowadza się do modelu jednodiodowego. Można zauważyć, że rezystancje równoległe r_{sh} zbliżone są w obu modelach (SEM i VDEM), natomiast rezystancje szeregowy są znacznie większe w modelu VDEM niż w modelu jednodiodowym SEM.

Dopasowania modelem jednodiodowym nie zawsze dają realne wartości parametrów. Dalej przedstawione są wyniki dopasowania ogniwa 42,4 z użyciem modelu SEM i VDEM. Model DEM nie nadaje się dla ogniw perowskitowych, jak to zostało pokazane wcześniej. W modelu SEM, pomimo dobrych dopasowań, rezystancje szeregowy przyjmują ujemne wartości, natomiast parametr n przyjmuje bardzo wysokie wartości powyżej 8. Model ten więc nie może być stosowany dla tego ogniwa, co świad-

czy o tym, że ogniwo bardzo różni się od ogniwa idealnego. Natomiast model VDEM daje w wyniku rezystancje szeregowo dodatnie o wartości $6,9 \Omega \text{ cm}^2$ i $8,7 \Omega \text{ cm}^2$ dla obu kierunków skanowania. Parametr n przyjmuje dla każdego dopasowania wartość maksymalną ($n = 5,00$) w procedurze obliczeniowej dla modelu VDEM.

Tabela 12. Parametry diodowe ogniwa perowskitowego (42.4) dla modelu SEM (a) i VDEM (b)
Table 12. Diode parameters of the perovskite solar cell (42.4) for SEM (a) and VDEM (b) model

(a) Model SEM

Skan	r_{sh}	r_s	J_0	n	σ
–	$\text{k}\Omega \text{ cm}^2$	$\Omega \text{ cm}^2$	$\mu\text{A}/\text{cm}^2$	–	%
$F \rightarrow R$	3,36	-1,82	340	8,6	0,93
$R \rightarrow F$	1,64	-0,83	33,5	8,0	0,20

(b) Model VDEM

Skan	r_{sh}	r_s	J_{01}	J_{02}	n_2	σ
–	$\text{k}\Omega \text{ cm}^2$	$\Omega \text{ cm}^2$	A/cm^2	$\mu\text{A}/\text{cm}^2$	–	%
$F \rightarrow R$	1,13	6,9	$7,9 \times 10^{-18}$	16,2	5,00	1,02
$R \rightarrow F$	0,78	8,7	$9,7 \times 10^{-18}$	14,4	5,00	0,70

Parametry elektryczne uzyskane w funkcji Lamberta W^*

Charakterystykę ogniwa (42.4) poddano dodatkowo analizie z użyciem funkcji Lamberta W . W tabeli 13 przedstawiono parametry diodowe. Współczynnik jakości diody wynosi 5,4 dla kierunku skanowania $F \rightarrow R$ i 5,1 dla kierunku skanowania $R \rightarrow F$. Rezystancje równoległe są mniejsze niż uzyskane dla dopasowania modelem VDEM (tab. 12), ale widać podobną zależność rezystancji r_{sh} od kierunku skanowania.

Tabela 13. Parametry diodowe uzyskane z wykorzystaniem funkcji Lamberta W (ogniwo 42.4)
Table 13. The diode parameters obtained with the using of Lambert W function (cell no. 42.4)

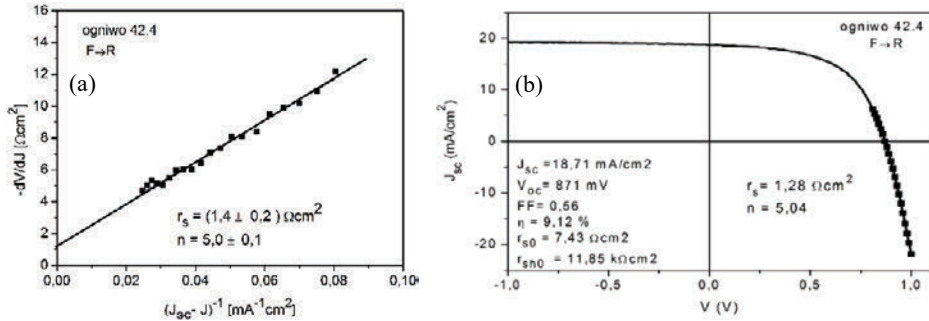
Skan	n	J_0	r_s	r_{sh}
		$\mu\text{A}/\text{cm}^2$	$\Omega \text{ cm}^2$	$\text{k}\Omega \text{ cm}^2$
$F \rightarrow R$	5,4	31,4	2,4	0,78
$R \rightarrow F$	5,1	11,2	1,8	0,26

Parametry uzyskane z modelu jednodiodowego z użyciem regresji liniowej

Do obliczeń wykorzystano równania (32) i (33). Metody tej użył Shi i wsp. [36] do analizy ogniw perowskitowych.

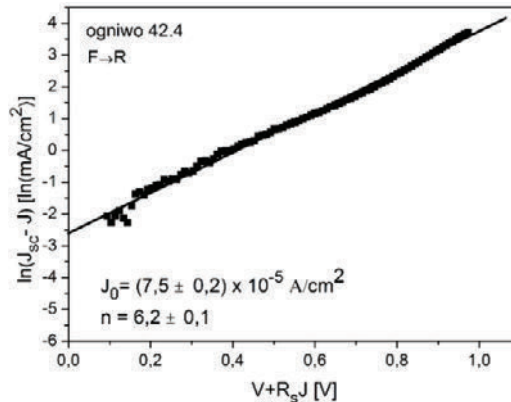
* Obliczenia z użyciem funkcji Lamberta W przez dr inż. W. Dawidowskiego z Politechniki Wrocławskiej.

Na rysunku 27 przedstawiona jest charakterystyka I-V ogniwa oraz jego podstawowe parametry elektryczne, a także obliczone wartości r_s i n .



Rys. 27. Wykres zależności $-dV/dJ$ od $(J_{sc} - J)^{-1}$ i liniowe dopasowanie punktów eksperymentalnych (a), charakterystyka J-V ogniwa z zaznaczonymi punktami użytymi w dopasowaniu (b)
 Fig. 27. Plot of $-dV/dJ$ vs. $(J_{sc} - J)^{-1}$ and linear fitting of the experimental points (a), the J-V characteristics marked with the points used in the fitting (b)

Parametry te obliczono na podstawie regresji liniowej punktów eksperymentalnych o współrzędnych $[(J_{sc} - J)^{-1}, -dV/dJ]$. Do regresji liniowej tylko część punktów pomiarowych w okolicy napięcia V_{oc} nadaje się do tego celu. Punktom tym odpowiadają zaznaczone punkty na charakterystyce I-V (rys. 27b). W podobny sposób, wykreślając punkty o współrzędnych $[V + R_s J(V), \ln(J_{sc} - J)]$ i wykonując regresję liniową, otrzymuje się wartości J_0 i n (rys. 28).



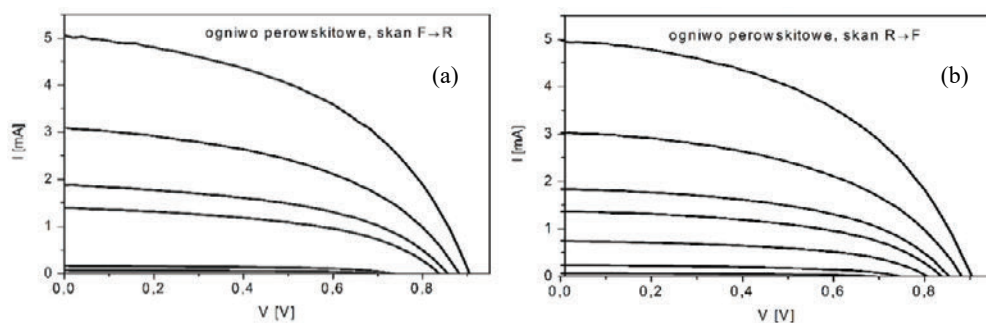
Rys. 28. Wykres zależności $\ln(J_{sc} - J)$ od $V + R_s J$ i liniowe dopasowanie punktów eksperymentalnych
 Fig. 28. Plot of the $\ln(J_{sc} - J)$ against $V + R_s J$ and the linear fitting of the experimental points

Tabela 14. Parametry diodowe uzyskane na podstawie wykresów z rys. 27 i 28
 Table 14. The diode parameters obtained on the basis of the plots from Figs. 27 and 28

Ogniwo	Skan	n_1	J_{01} [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]	r_s [$\Omega \text{ cm}^2$]	Uwagi
42.4	$F \rightarrow R$	$5,0 \pm 0,1$	–	1,4	z rys. 27
42.4	$F \rightarrow R$	$6,2 \pm 0,1$	$0,75 \pm 0,2$	–	z rys. 28

Parametry rezystancji szeregowej uzyskane z wykresów $I_{sc}-V_{oc}$

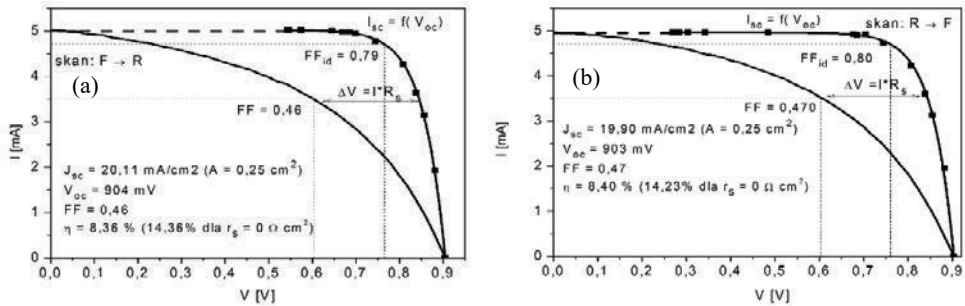
Dalej przedstawiono wartości rezystancji szeregowej i inne uzyskane z charakterystyk $I_{sc}-V_{oc}$ zmierzonych dla różnych natężeń oświetlenia. Do uzyskania poprawnych wyników muszą być spełnione odpowiednie warunki: prąd I_{sc} powinien być proporcjonalny do natężenia światła, temperatura ogniwa powinna być stała w czasie pomiarów oraz ogniwa powinny charakteryzować się dużą stabilnością, tzn. charakterystyki I-V mierzone w różnych odstępach czasowych powinny się różnić jedynie w granicach statystycznego rozrzutu. Warunki te są trudne do spełnienia dla ogniwa perowskitowych, głównie ze względu na ich małą stabilność, mimo to przeprowadzono tego typu badania dla ogniwa perowskitowego. W celu uzyskania charakterystyk $I_{sc}-V_{oc}$ ogniwo przykrywano czarnymi siatkami, kolejno jedną, dwoma itp. aż do uzyskania zacielenia granicznego, dla którego mierzony prąd I_{sc} wynosił ok. 0,2% początkowej wartości. Na rysunku 29 przedstawione są wykresy I-V ogniwa dla różnego natężenia światła padającego na ogniwo.



Rys. 29. Charakterystyki I-V ogniwa perowskitowego (39.1) dla różnych natężeń światła, dla dwu kierunków skanowania
 Fig. 29. The I-V characteristics of the perovskite solar cells (39.1) for different light intensities, for the two scanning directions

Na rysunku 30 przedstawione są charakterystyki I-V i charakterystyki $I_{sc}-V_{oc}$, a na rys. 31 obliczoną rezystancję szeregową dla dwóch kierunków skanowania. Na wykresach zaznaczono prąd w punkcie maksymalnej mocy, dla którego podano wartości rezystancji szeregowej w tabeli 15. Wartości tych rezystancji zmieniają się w bardzo dużym zakresie. Najmniejsze wartości około $9 \Omega \text{ cm}^2$ przyjmują dla napięcia V_{oc}

($I = 0$ A) i wzrastają wraz z wartością prądu. Dla punktu maksymalnej mocy wynoszą około $17 \Omega \text{ cm}^2$. W tabeli 15 przedstawione są wartości rezystancji szeregowych dla punktu maksymalnej mocy oraz dynamiczne rezystancje szeregowo. Ponieważ dynamiczne rezystancje są mniejsze, podane rezystancje szeregowo są zawyżone, co może być wytłumaczone brakiem powtarzalności pomiarów charakterystyk I-V, co jest koniecznym warunkiem, by uzyskać poprawne wyniki.

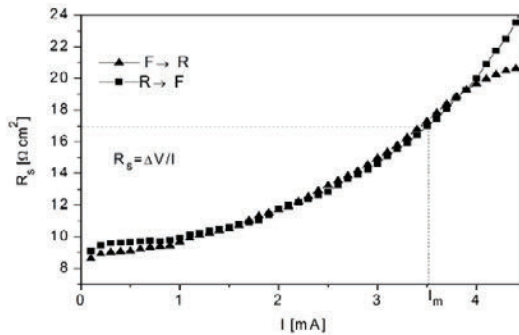


Rys. 30. Wykres zależności I_{sc} od V_{oc} i charakterystyka I-V ogniwa perowskitowego (39.1).

Z porównania obu wykresów określono rezystancję szeregową ogniwa

Fig. 30. Plot of the I_{sc} vs. V_{oc} and I-V characteristics of the perovskite cell (39.1).

A comparison of the two graphs determines the series resistance of the cell



Rys. 31. Rezystancja szeregowo ogniwa określona na podstawie rys. 30.

Na wykresach zaznaczony jest punkt odpowiadający maksymalnej mocy

Fig. 31. Series resistance cells determined on the basis of the Fig. 30.

The plots are marked with the point corresponding to the maximum power

Tabela 15. Rezystancja szeregowo r_s określona na podstawie wykresów $I_{sc} - V_{oc}$

Table 15. The series resistance r_s from the $I_s - V_{oc}$ plots

Skon	$r_{s0} [\Omega \text{ cm}^2]$	$r_s [\Omega \text{ cm}^2]$
F → R	9,2	17
R → F	9,6	17

10.3. WSPÓŁCZYNNIKI TEMPERATUROWE OGNIW KRZEMOWYCH I PEROWSKITOWYCH

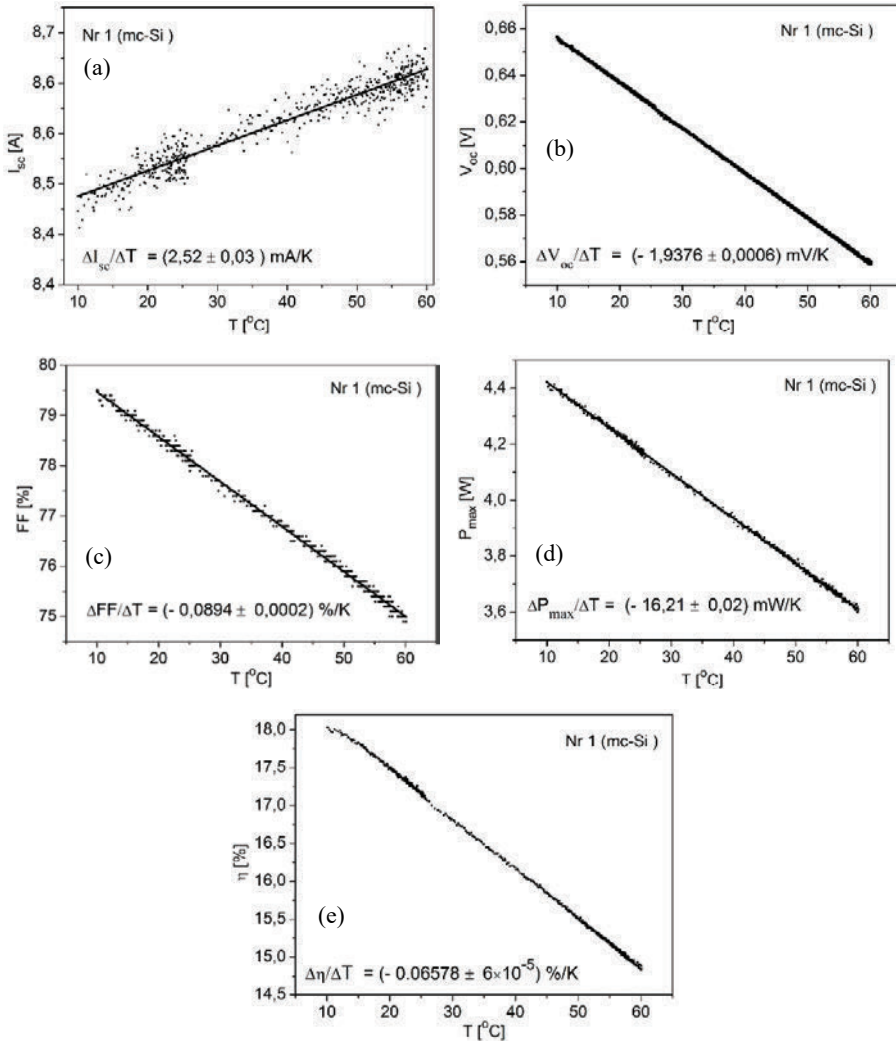
Moc modułu i ogniw słonecznych podawana jest zwykle dla warunków STC, tzn. widmo A M1,5 temperatura 25 °C. Rzeczywiste warunki pracy modułów zwykle znacznie odbiegają od tych warunków. Nie tylko inne jest widmo promieniowania słonecznego i jego moc, ale i również temperatura ogniw w module znacznie może odbiegać od 25 °C. Temperatura ta może osiągnąć nawet 60 °C. Określenie zależności parametrów V_{oc} , I_{sc} i FF od temperatury jest istotne dla poprawnego zaprojektowania systemu fotowoltaicznego. Jest to szczególnie ważne wtedy, gdy system PV ma znajdować się w regionach o dużym nasłonecznieniu. Współczynniki temperaturowe mogą bardzo się różnić między sobą, nie tylko ze względu na rodzaj użytego półprzewodnika, ale i również od technologii wytworzenia ogniw, opartych na danym półprzewodniku, np. krzemie. Maksymalna moc ogniw krzemowych zwykle zmniejsza się w granicach 0,4–0,50%/K. Przykładem może być moduł firmy Suntech o mocy 190 W, zbudowany z ogniw monokrystalicznych. Temperaturowy współczynnik mocy wynosi $-0,48\%/K$. Wynika stąd, że moc tego modułu w letni dzień, gdy temperatura osiągnie 45 °C, będzie o 10% niższa niż w temperaturze 25 °C po założeniu takiego samego natężenia promieniowania.

Moduły z krzemu monokrystalicznego i polikrystalicznego mają zwykle współczynniki temperatury w granicach $-0,44$ – $0,50\%/K$. Moduły firmy Sunpower zbudowane z wysokosprawnych krzemowych ogniw monokrystalicznych, mają współczynnik wyjątkowo mały (dokładniej: małą wartość bezwzględną) i wynosi on ok. $-0,38\%/K$. Jeszcze mniejszą wartość bezwzględną współczynnika temperaturowego mają moduły zbudowane z CdTe. Wynosi on ok. $-0,25\%/K$. Ogniw HJT, charakteryzujące się bardzo wysokimi sprawnościami, mają bardzo małe współczynniki temperaturowe. Wynoszą one około $-0,22\%/K$.

Dalej przedstawiono wyniki pomiarów zależności parametrów elektrycznych I_{sc} , V_{oc} , FF i mocy P_{max} i sprawności η w zależności od temperatury różnego typu ogniw krzemowych opartych na krzemie krystalicznym komercyjnych i wytworzonych w IMIM PAN (rys. 32) oraz ogniwa perowskitowego wykonanego w IMIM PAN (rys. 33). Na podstawie pomiarów określono temperaturowe współczynniki parametrów elektrycznych ogniw.

Pomiar charakterystyk I-V przeprowadzono z użyciem systemu SS I-V CT-02 (PV Test Solutions). W skład systemu wchodzi kontroler temperatury stolika pomiarowego w zakresie ~ 0 – 60 °C. Zasada działania kontrolera polega na zasilaniu czterech ogniw Peltiera o maksymalnej mocy 280 W. W zależności od kierunku przepływu prądu elektrycznego stolik pomiarowy jest ogrzewany lub chłodzony z określoną prędkością. Pomiar ogniw krzemowych przeprowadzono automatycznie z określoną częstotliwością pomiarów charakterystyk I-V o ciągłej, wolnej zmianie temperatury stolika ok. 1 K/min. W wyniku pomiaru rejestrowane są charakterystyki I-V i parametry elektryczne dla każdej temperatury oraz zbiorcze dane przedstawiające zależności zmierzonych para-

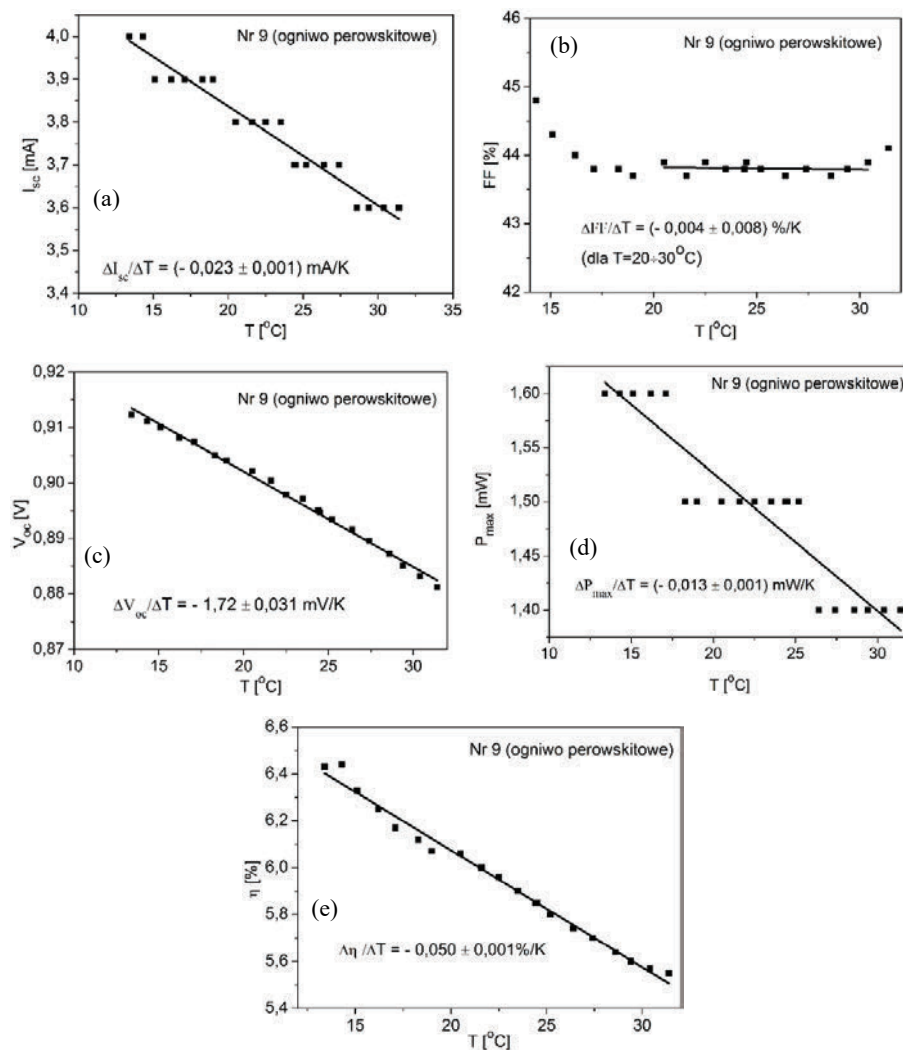
metrów elektrycznych I_{sc} , V_{oc} , FF , P_{max} , w funkcji temperatury. Współczynniki temperaturowe odczytywane są po każdej serii pomiarów obejmującej określony przedział temperatur. Niezależnie od automatycznego uzyskiwania wartości współczynników, ich wartości określono na podstawie aproksymacji liniowej punktów eksperymentalnych, tak jak przedstawiono na rys. 32.



Rys. 32. Wykresy parametrów elektrycznych ogniwa I_{sc} , V_{oc} , FF , P_{max} , E_{ff} dla różnych temperatur w zakresie 10–60 $^{\circ}\text{C}$ z użyciem symulatora promieniowania słonecznego SS200AAA (Photo Emission Tech., InC.) wraz z systemem pomiarowym SS I-V CT-02

Fig. 32. Electrical parameters values of mc-Si solar cell I_{sc} , V_{oc} , FF , P_{max} , E_{ff} for different temperatures in the temperature range of 10–60 $^{\circ}\text{C}$

W przypadku ogniwa perowskitowego na bazie $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ pomiar przeprowadzono w odmienny sposób. Ponieważ ogniwo to ma na górnej powierzchni szkło grubości 2,2 mm, stabilizacja temperatury nie jest tak szybka jak ogniwa krzemowego. Dlatego też dla każdej temperatury pomiarowej przed wykonaniem pomiaru badane ogniwo pozostawało na stoliku przez 3 min. Taką zwłokę czasową uznano za wystarczającą na uzyskanie stabilizacji temperatury ogniwa.



Rys. 33. Wartości parametrów elektrycznych ogniwa perowskitowego I_{sc} , V_{oc} , FF , P_{max} , E_{ff} dla różnych temperatur w zakresie 15–35 °C

Fig. 33. Electrical parameters values of solar cell I_{sc} , V_{oc} , FF , P_{max} , E_{ff} for different temperatures in the temperature range of 15–35 °C

Na rysunku 33 przedstawiono parametry współczynników temperaturowych ogniwa perowskitowego nr 9. Parametry elektryczne ogniwa są następujące (w nawiasach podano niepewności standardowe):

$$I_{sc} = (3,76 \pm 0,05 \text{ mA}), V_{oc} = (889 \pm 2 \text{ mV}), FF = (0,52 \pm 0,01), \eta = (6,9 \pm 0,5) \%$$

Wartości prądu zwarciovego w funkcji temperatury jakkolwiek posiadają znaczny rozrzut od linii aproksymacyjnej, to jednak wykazują jedną cechę – ich wartość maleje wraz z temperaturą. Takie zachowanie prądu I_{sc} jest odwrotne niż w przypadku większości półprzewodników, np. krzemu. Związane to jest ze wzrostem przerwy energetycznej wraz ze wzrostem temperatury, jaki się obserwuje dla tego typu perowskitów. Na rys. 33c przedstawiona jest zależność współczynnika FF od temperatury. Jest to nietypowa zależność, dla zwykłych ogniw FF maleje wraz z temperaturą, podczas gdy dla badanego ogniwa perowskitowego FF najpierw maleje, następnie przyjmuje stałą wartość. Taki przebieg może być wytłumaczony, jeśli weźmie się pod uwagę wzrost przewodnictwa perowskitu i innych warstw organicznych wraz z temperaturą. Wyniki dotyczące współczynników temperaturowych wszystkich badanych ogniw przedstawiono w tabelach 16 i 17. Podano wartości standardowej niepewności współczynników.

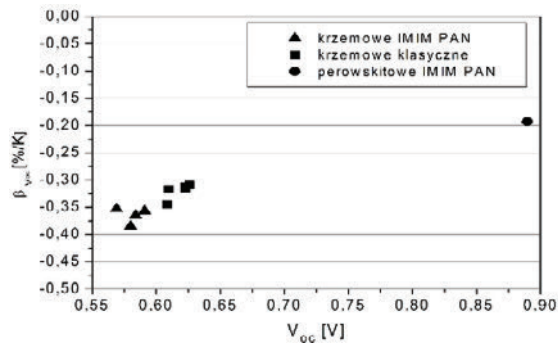
Tabela. 16. Współczynniki temperaturowe
Table 16. Temperature coefficients

Nr	Ogniwo	$\Delta I_{sc}/\Delta T$ [mA/K]	$\Delta V_{oc}/\Delta T$ [mV/K]	$\Delta FF/\Delta T$ [%/K]	$\Delta P_{MPP}/\Delta T$ [mW/K]	$\Delta \eta/\Delta T$ [%/K]
1	mc-Si	2,517 $\pm 3,26 \times 10^{-2}$	-1,938 $\pm 6 \times 10^{-4}$	-0,0890 $\pm 26 \times 10^{-4}$	-16,210 $\pm 1,76 \times 10^{-2}$	-0,06578 $\pm 5 \times 10^{-5}$
2	mc-Si	2,347 $\pm 3,1 \times 10^{-2}$	-1,946 $\pm 7 \times 10^{-4}$	-0,0900 $\pm 3 \times 10^{-4}$	-15,974 $\pm 1,6 \times 10^{-2}$	-0,06500 $\pm 4 \times 10^{-5}$
3	mc-Si	3,081 $\pm 3,8 \times 10^{-2}$	-2,1063 $\pm 9 \times 10^{-4}$	-0,1250 $\pm 3 \times 10^{-4}$	-17,256 $\pm 0,030$	-0,0703 $\pm 1 \times 10^{-4}$
4	mc-Si	3,214 $\pm 4 \times 10^{-2}$	-1,972 $\pm 6 \times 10^{-4}$	-0,097 $\pm 3 \times 10^{-4}$	-15,609 $\pm 0,0208$	-0,0645 $\pm 1 \times 10^{-4}$
5	Cz-Si	2,274 $\pm 4,7 \times 10^{-2}$	-1,995 $\pm 0,0010$	-0,094 $\pm 3 \times 10^{-4}$	-17,116 $\pm 3,4 \times 10^{-2}$	-0,0708 $\pm 1 \times 10^{-4}$
6	Cz-Si	1,315 $\pm 2,9 \times 10^{-2}$	-2,106 $\pm 1 \times 10^{-3}$	-0,017 $\pm 0,020$	-5,804 $\pm 0,014$	-0,0740 $\pm 4,4 \times 10^{-3}$
7	mc-Si	2,154 $\pm 1,5 \times 10^{-2}$	-1,986 $\pm 6 \times 10^{-4}$	-0,097 $\pm 4 \times 10^{-4}$	-4,519 $\pm 8,6 \times 10^{-3}$	-0,0460 $\pm 1 \times 10^{-4}$
8	mc-Si	0,715 $\pm 4,0 \times 10^{-2}$	-2,133 $\pm 2 \times 10^{-3}$	-0,11 $\pm 5 \times 10^{-4}$	-6,027 $\pm 1,7 \times 10^{-2}$	-0,0600 $\pm 1 \times 10^{-4}$
9	perowskit	-0,023 $\pm 1 \times 10^{-3}$	-1,720 $\pm 3,1 \times 10^{-2}$	-0,004 $\pm 8 \times 10^{-3}$	-0,013 $\pm 1 \times 10^{-3}$	-0,050 $\pm 1 \times 10^{-3}$

Tabela 17. Względne współczynniki temperaturowe β_G dla temperatury 25 °C
 Table 17. The normalized temperature coefficients β_G for temperature of 25 °C

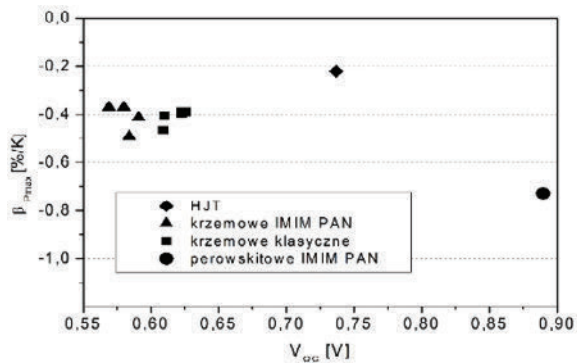
Nr	$\beta_{I_{sc}}$ [%/K]	β_{FF} [%/K]	$\beta_{V_{oc}}$ [%/K]	$\beta_{P_{max}}$ [%/K]	β_{η} [%/K]
1	0,030 $\pm 3,81 \times 10^{-4}$	-0,114 $\pm 2,96 \times 10^{-4}$	-0,309 $\pm 9,58 \times 10^{-5}$	-0,395 $\pm 4,13 \times 10^{-4}$	-0,410 $\pm 2,96 \times 10^{-6}$
2	0,028 $\pm 3,74 \times 10^{-4}$	0,115 $\pm 2,39 \times 10^{-4}$	-0,312 $\pm 1,12 \times 10^{-4}$	-0,394 $\pm 3,95 \times 10^{-4}$	-0,388 $\pm 2,39 \times 10^{-6}$
3	0,039 $\pm 4,78 \times 10^{-4}$	-0,165 $\pm 6,61 \times 10^{-4}$	-0,345 $\pm 1,48 \times 10^{-4}$	-0,472 $\pm 5,17 \times 10^{-4}$	-0,465 $\pm 6,61 \times 10^{-6}$
4	0,039 $\pm 4,88 \times 10^{-4}$	-0,123 $\pm 4,22 \times 10^{-4}$	-0,316 $\pm 9,63 \times 10^{-5}$	-0,388 $\pm 5,17 \times 10^{-4}$	-0,389 $\pm 4,22 \times 10^{-6}$
5	0,029 $\pm 5,92 \times 10^{-4}$	-0,124 $\pm 7,94 \times 10^{-4}$	-0,327 $\pm 1,64 \times 10^{-4}$	-0,467 $\pm 9,28 \times 10^{-4}$	-0,468 $\pm 7,94 \times 10^{-6}$
6	0,041 $\pm 9,03 \times 10^{-4}$	-0,022 $\pm 3,1 \times 10^{-2}$	-0,356 $\pm 1,69 \times 10^{-4}$	-0,405 $\pm 9,77 \times 10^{-4}$	-0,516 $\pm 3,07 \times 10^{-4}$
7	0,082 $\pm 5,71 \times 10^{-4}$	-0,127 $\pm 8,57 \times 10^{-4}$	-0,342 $\pm 1,03 \times 10^{-4}$	-0,387 $\pm 7,37 \times 10^{-4}$	-0,394 $\pm 8,57 \times 10^{-6}$
8	0,024 $\pm 1,3 \times 10^{-3}$	-0,158 $\pm 8,28 \times 10^{-4}$	-0,365 $\pm 3,42 \times 10^{-4}$	-0,499 $\pm 1,4 \times 10^{-3}$	-0,497 $\pm 8,28 \times 10^{-6}$
9	-0,612 $\pm 2,7 \times 10^{-2}$	-0,008 $\pm 1,4 \times 10^{-2}$	-0,193 $\pm 3 \times 10^{-3}$	-0,748 $\pm 5,7 \times 10^{-2}$	-0,726 $\pm 1,45 \times 10^{-4}$

Jak już stwierdzono w rozdziale 7, współczynniki temperaturowe zależą od napięcia V_{oc} , które z kolei zależy głównie od szerokości przerwy energetycznej. Ale nawet dla ogniw wykonanych z jednego rodzaju półprzewodnika istnieje duży przedział w wartościach napięcia w V_{oc} w zależności od stopnia zaawansowania technologii. Wiadomo np., że ogniwa typu HJT, mające największe wartości napięcia V_{oc} , mają również najmniejszy współczynnik temperaturowy mocy (co do wartości bezwzględnej). Żeby sprawdzić czy istnieje taka zależność, na rys. 34 przedstawiono obliczone wartości współczynnika temperaturowego napięcia V_{oc} , a na rys. 35 współczynnika temperaturowego maksymalnej mocy w zależności od napięcia V_{oc} . Na rysunku 35 umieszczono ponadto jeden punkt odpowiadający ogniwu typu HJT (na podstawie danych literaturowych). Z rysunku 34 widać, że współczynniki temperaturowe V_{oc} rzeczywiście wykazują taką zależność od V_{oc} . Natomiast z rys. 35 wynika, że podobna zależność występuje dla ogniw krzemowych, a dla ogniwa perowskitowego współczynnik ten przyjmuje jednak większą wartość (co do wartości bezw.), co jest spowodowane zmniejszeniem prądu I_{sc} wraz z temperaturą. Z wykresu tego wynika, że ogniwa perowskitowe w większym stopniu tracą moc niż ogniwa krzemowe, kiedy wzrasta ich temperatura. Taki sam efekt można zauważyć dla maksymalnych teoretycznych wartości sprawności przedstawionych na rys. 4.



Rys. 34. Współczynnik temperaturowy napięcia obwodu otwartego V_{oc} dla różnych wartości napięcia V_{oc}

Fig. 34. Temperature coefficient of voltage V_{oc} for different values of V_{oc}



Rys. 35. Współczynnik temperaturowy maksymalnej mocy dla różnych wartości napięcia V_{oc} .

Na wykresie umieszczono dodatkowo punkt dla ogniwa HJT (dane z literatury)

Fig. 35. Temperature coefficient of maximal power P_{max} for different values of V_{oc} .

Additionally the point for HJT cell (data for HJT from literature)

11. OBRAZOWANE LUMINESCENCYJNE

11.1. WSTĘP

Obrazowanie fotoluminescencyjne (PL) i elektroluminescencyjne (EL) stosuje się do szybkiej identyfikacji defektów w ogniwach i w modułach fotowoltaicznych [75–83]. Techniki te są obecnie stosowane nie tylko w produkcji wielkoprzemysłowej, ale i również w laboratoriach badawczych. Są coraz bardziej rozwijane w celu uzyskiwania nie tylko obrazów luminescencyjnych, ale i również map rozkładu różnych wielkości fizycznych, np. czasu życia nośników w materiale, rezystancji szeregowej

i równoległej oraz gęstości ciemnego prądu nasycenia. Pomiar efektywnego czasu życia nośników jest o kilka rzędów szybszy w porównaniu ze znaną metodą MWPCD (metodą zaniku fotoprzewodnictwa w stanie nieustalonym z detekcją mikrofalową). Są to stosunkowo młode techniki charakteryzacji ogniw i modułów. Po raz pierwszy obrazowanie EL [75] w ogniwach i obrazowanie PL w ogniwach i płytkach [76] zostało zademonstrowane w roku 2005. Obrazowanie PL umożliwia charakteryzowanie płytek krzemowych po każdym etapie technologicznym, począwszy od materiału wyjściowego. Jest to metoda bezkontaktowa, idealnie więc nadaje się do produkcji przemysłowej, gdyż nie powoduje uszkodzeń mechanicznych. Natomiast w obrazowaniu EL uzyskuje się obrazy tylko gotowych ogniw lub modułów, ponieważ do uzyskania świecenia konieczne jest przyłożenie napięcia do ich elektrod podobnie jak w zwykłych diodach świecących LED [77]. Techniki PL i EL stosowane są najczęściej do ogniw krzemowych, ale znajduje również coraz to większe zainteresowanie do badań ogniw opartych na innych materiałach, np. ogniw perowskitowych [81]. Dla ogniw perowskitowych technika ta może być bardzo przydatna w przypadku skalowania procesu z małych rozmiarów (rzędu mm) do dużych rozmiarów (rzędu 10 cm) typowych w produkcji ogniw, kiedy jednorodność struktury determinuje sprawność ogniwa.

W obrazowaniu fotoluminescencyjnym (PL) cała powierzchnia badanego materiału półprzewodnikowego (np. płytki krzemowej) jest równomiernie oświetlona światłem monochromatycznym o określonej długości fali powodującej generację nośników prądu elektrycznego. W wyniku rekombinacji promienistej nadmiarowych nośników prądu następuje emisja światła, które jest zbierane przez kamerę wyposażoną w odpowiedni filtr odcinający promieniowanie odbite od powierzchni próbki. Natomiast w obrazowaniu elektroluminescencyjnym (EL) nadmiarowe nośniki są wstrzykiwane przez złącze, do którego przyłożone jest odpowiednio wysokie napięcie w kierunku przewodzenia. W tym przypadku bada się kompletne ogniwo mające złącze i kontakty elektryczne. Metodę tę stosuje się więc zarówno do ogniw słonecznych, jak i do modułów fotowoltaicznych.

W niniejszej pracy przedstawione są wyniki badań EL i PL ogniw i modułu fotowoltaicznego wykonanych z krzemu. Obraz luminescencyjny pochodzi z emisji międzypasmowej w krzemie, której maksimum natężenia przypada dla długości około 1140 nm. Widmo promieniowania PL rozciągnięte jest dla zakresu fal około 900–1250 nm. Promieniowanie to może być rejestrowane całkowicie przez kamerę wyposażoną w detektor InGaAs lub tylko częściowo przez kamery CCD wyposażone w detektory krzemowe (tab. 18). Najczęściej stosuje się kamery CCD ze względu na ich znacznie niższą cenę oraz wysoką rozdzielczość detektorów krzemowych. Wśród kamer CCD stosuje się kamery, których detektory krzemowe mają niską czułość z maksimum ok. 600 nm oraz kamery CCD wyposażone w detektory *back illuminated deep depletion* charakteryzujące się podwyższoną czułością dla fal długich z maksimum czułości ok. 800 nm. W tabeli 18 przedstawione są niektóre parametry detektorów używanych w kamerach do obrazowania PL-EL. System „PLpix” znajdujący się w Laboratorium

Fotowoltaicznym IMIM PAN w Kozach ma kamerę, w której znajdują się detektory Si-CCD typu Kodak KAF-16803.

Promieniowanie luminescencyjne zawiera wiele informacji charakteryzujących ogniwa słoneczne, gdyż prędkość emisji spontanicznej dla przejść międzypasmowych jest związana z fizycznymi wielkościami, takimi jak iloczyn koncentracji elektronów i dziur, czas życia nośników mniejszościowych, rozczepienie quasi-poziomów Fermiego czy napięcie na zaciskach diody.

Tabela 18. Niektóre parametry detektorów w kamerach używanych do obrazowania PL i EL
Table 18. Some parameters of detectors in cameras used for PL and EL imaging

Detektor	Zakres QE [nm]	Maksimum QE [%]	Rozdzielczość (piksele)
InGaAs	900–1700	90	640 × 540
Si-CCD „back illuminated”	200–1100	90 (800 nm)	2049 × 4096
Si-CCD (KAF-16803)	200–1100	60 (600 nm)	4096 × 4096

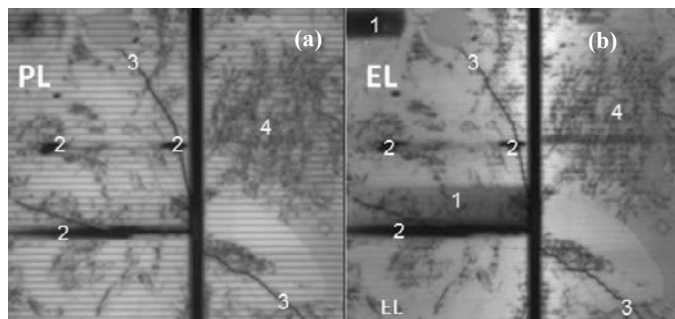
Obraz PL i EL zawiera np. informację o rozkładzie na powierzchni płytki efektywnego czasu życia nośników mniejszościowych w warunkach pracy ogniwa [77]. Obszarom jasnym można przyporządkować większą wartość czasu życia nośników niż obszarom ciemnym. Ciemne obszary mogą być obszarami płytki krzemowej, które zawierają dużą koncentrację zanieczyszczeń. Są to obszary np. w pobliżu brzegów bloku krzemowego, z którego wycinane są płytki. Obraz PL uwidacznia również rozmaite defekty krystalograficzne, jak np. granice ziaren, skupiska dyslokacji. Innego typu defektami są mikropęknięcia, które wprowadzane są w czasie różnych procesów technologicznych.

Zależność emisji od iloczynu koncentracji elektronów i dziur ułatwia również ilościowe zobrazowanie rozkładu czasu życia nośników w płytce. Pomiar taki wymaga jednak kalibracji z użyciem innej metody. Najczęściej stosowaną metodą jest pomiar czasu życia nośników metodą zaniku przewodnictwa w stanie quasi-ustalonym (QSSPC), która daje uśrednioną wartość czasu życia dla określonego obszaru.

11.2. OBRAZOWANIE PL I EL

W systemie PL-EL o nazwie „PLpix” źródłem światła jest laser o mocy 90 W i długości fali 808 nm. Światło to po przejściu przez filtr odcinający promieniowanie odbite od powierzchni próbki oraz homogenizator, oświetla równomiernie płytkę o maksymalnym rozmiarze 20 × 20 cm (niejednorodność oświetlenia na poziomie $\pm 2\%$). Do pomiaru EL, do zacisków ogniwa lub modułu podłącza się zasilacz DC prądowo-napięciowy (max. napięcie 70 V, max. prąd 12 A, max. moc 800 W). W skład systemu wchodzi kamera CCD. System jest zintegrowany ze stanowiskiem WCT-120

QSSPC firmy Sinton Consulting, co umożliwia wyskalowanie map efektywnego czasu życia nośników mniejszościowych. Na rysunku 36 przedstawiony jest obraz PL (a) i EL (b) ogniwa z krzemu multikrystalicznego (mc-Si).



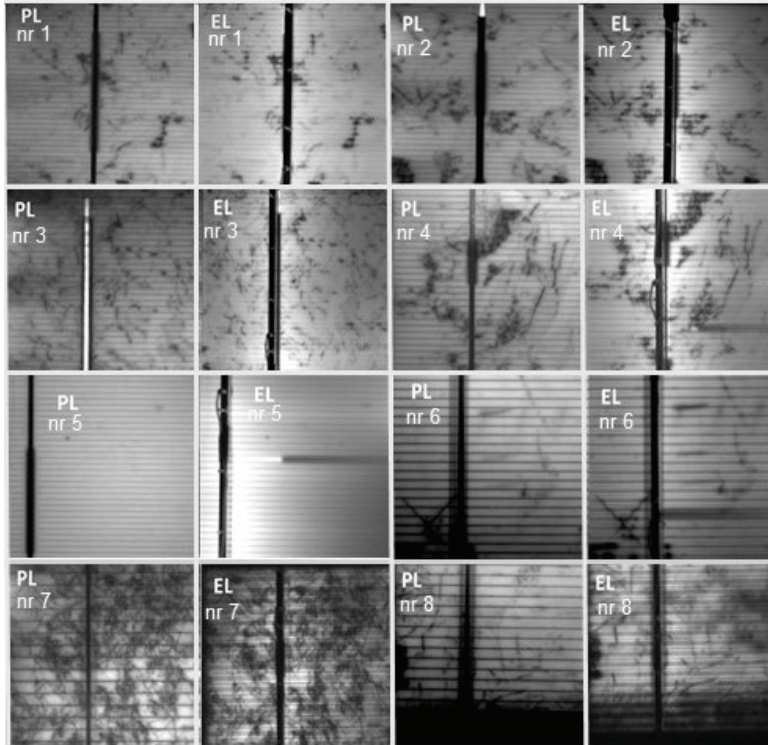
Rys. 36. Obraz PL (a) i EL (b) fragmentu krzemowego ogniwa słonecznego mc-Si ($156 \times 156 \text{ mm}^2$). Zaznaczono różnego typu defekty: uszkodzone ścieżki kontaktów (1), uszkodzona warstwa złącza (2), mikropęknięcia (3), obszar zawierający dużą koncentrację dyslokacji (4)

Fig. 36. PL image (a) and EL (b) of mc-Si silicon solar cell part ($156 \times 156 \text{ mm}^2$). Different types of defects are selected: damaged paths of contacts (1), damaged junction (2) micro-cracking (3), and an area containing a high concentration of dislocations (4)

Na obrazach PL i EL widoczne są ciemne obszary odpowiadające różnym rodzajom defektów. Ciemne obszary nr 1 obecne na obrazie EL związane są z całkowym wytrawieniem ścieżek kontaktów w tym obszarze. Obraz PL nie ujawnia tego typu uszkodzeń w ścieżkach. Innego rodzaju defekty są reprezentowane przez obszary nr 2 na obrazie PL. Powstały one w wyniku mechanicznego uszkodzenia złącza i warstwy pasywująco-antyrefleksyjnej w tych obszarach. Można zauważyć, że identyczne ciemne obszary występują również na obrazie EL, co jest zrozumiałe, gdyż w obszarach tych nastąpił wzrost rekombinacji powierzchniowej powodującej zmniejszenie efektywnego czasu życia nośników. Natomiast obszar nr 3 obejmuje mikropęknięcie widoczne w postaci linii wychodzących z jednego punktu. Inny typ defektów prezentuje obszar nr 4 na obrazie PL, widoczny również na obrazie EL. Tego rodzaju ciemne nieregularne obszary związane są z dużą koncentracją dyslokacji krystalograficznych.

Na rysunku 37 przedstawione są obrazy PL i EL badanych ogniw krzemowych, których parametry elektryczne dla warunków standardowych STC (natężenie promieniowania 1000 W/m^2 , widmo słoneczne AM1.5, $25 \text{ }^\circ\text{C}$) są podane w tabeli 6. Widoczne są ciemne obszary związane z różnymi rodzajami defektów. Na obrazach dla ogniw nr 1, 2, 3, 4, 7 i 8 są to głównie obszary związane z defektami występującymi w krzemie multikrystalicznym. Ogniwa nr 7 i 8 mają najwięcej ciemnych obszarów i dlatego ich sprawności są najniższe w wyniku gorszej pasywacji defektów oraz złej jakości płytek krzemowych. Na obrazie ogniwa nr 8 cały obszar w pobliżu

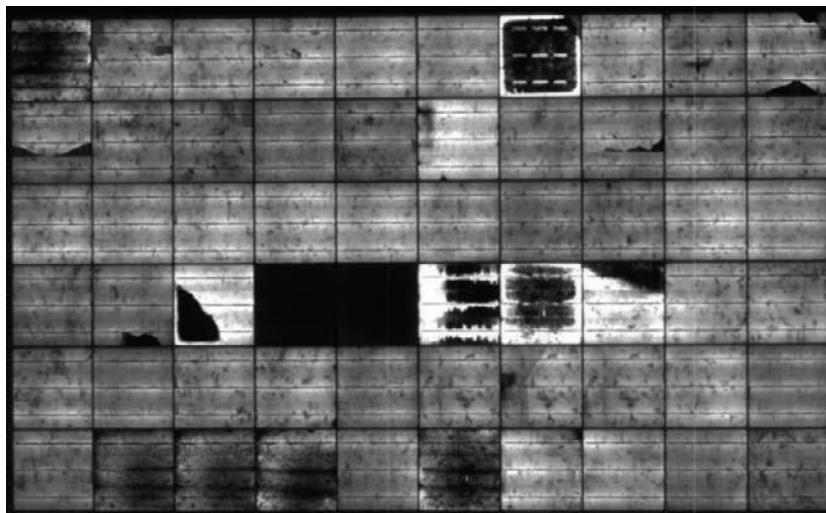
dolnej krawędzi jest ciemny, co jest spowodowane tym, że płytka krzemowa jest bardzo niskiej jakości. Obrazy ogniw nr 5 i 6 odpowiadają ogniwom monokrystalicznym.



Rys. 37. Obrazy PL-EL serii ogniw, których parametry elektryczne przedstawiono w tabeli 6
 Fig. 37. PL-EL images of the series of solar cells, which electrical parameters presented in table 6

Obrazy dla ogniwa nr 5 są jednak jaśniejsze, co jest związane z mniejszą rekombinacją nośników ładunku elektrycznego w obszarze emitera w wyniku lepszej pasywacji powierzchni i stosowania emiterów o dużej rezystywności (powyżej $50 \Omega \text{ cm}^2$) w produkowanych obecnie ogniwach. Poza tym w obu ogniwach widoczne są defekty na obrazach EL, które związane są z przerwanymi ścieżkami.

Na rysunku 38 przedstawiony jest obraz EL modułu fotowoltaicznego o mocy podanej przez producenta 250 W i rzeczywistej mocy 207 W zmierzonej w IMIM PAN. Obraz EL wyjaśnia dlaczego jest tak duża rozbieżność pomiędzy zmierzoną mocą a deklarowaną przez producenta. Widać ogniwa, które całkowicie nie są aktywne (czarne obszary). Są widoczne również liczne defekty w postaci pęknięć i prawdopodobnie dużej rekombinacji nośników w wyniku złej jakości płytek krzemowych lub braku dobrej pasywacji defektów.



Rys. 38. Obraz elektroluminescencji modułu fotowoltaicznego o mocy podanej przez producenta 250 W i rzeczywistej mocy 207 W zmierzonej w IMIM PAN

Fig. 38. Electroluminescence image of photovoltaic module with power specified by the manufacturer 250 W and the real power of 207 W measured in the IMMS PAS

12. WNIOSKI

Przedstawiono główne problemy pomiarowe ogniw słonecznych. Charakteryzowano dwa rodzaje ogniw: ogniwa krzemowe mono- i multikrystaliczne oraz ogniwa perowskitowe wytworzone w Laboratorium Fotowoltaicznym IMIM w Kozach. Pokazano różne źródła niepewności mierzonych parametrów ogniw. Do najważniejszych należy niedopasowanie spektralne, określenie powierzchni aktywnej, konieczność stosowania maski w czasie pomiarów charakterystyk I-V ogniw perowskitowych oraz wpływ temperatury. W przypadku ogniw perowskitowych na niepewność pomiarową ma również wpływ zależność zmierzonej charakterystyki od prędkości zmiany napięcia (prędkości skanowania) i od kierunku jego zmiany. Charakterystyki prądowo-napięciowe I-V ogniw analizowano z użyciem trzech modeli diodowych. Uzyskane parametry jakości diody n dla ogniw perowskitowych przyjmują bardzo wysokie wartości, co świadczy o tym, że ogniwa te bardzo różnią się od ogniw krzemowych ze złączem n - p .

W pracy przedstawiono również metodę charakteryzacji ogniw i modułów fotowoltaicznych z zastosowaniem obrazowania foto- i elektroluminescencyjnego. Obrazowanie to umożliwia bardzo szybko zidentyfikowanie różnego rodzaju defektów, jak mikropęknięcia, uszkodzenia ścieżek, wszelkiego rodzaju błędy w procesie produkcji. Tego typu metoda pomiarowa jest jeszcze w trakcie rozwoju w celu uzyskania nie

tylko jakościowej charakteryzacji, ale również ilościowej, w celu uzyskania, np. mapy rozkładu czasu życia nośników, rezystancji szeregowej w różnego typu ogniwach.

LITERATURA

- [1] GUEYMARD C., *Parameterized transmittance model for direct beam and circumsolar spectral irradiance*, Solar Energy, 2001, 71, 5, 325–346.
- [2] GUEYMARD C., MYERS D., EMERY K., *Proposed reference irradiance spectra for solar energy systems testing*, Solar Energy, 2002, 73, 443–467.
- [3] GUEYMARD C., *The sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models*, Solar Energy, 2004, 76, 4, 423–453.
- [4] <http://www.nrel.gov/rredc/smarts>.
- [5] RIORDAN C., HULSTROM R., *What is an air mass 1.5 spectrum?*, Photovoltaic Specialists Conference IEEE, 1990, 2, 1085–1088.
- [6] <http://www.pdas.com/atmos.html>.
- [7] <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/>
- [8] ZHAO J., WANG A., GREEN M.A., *24.5% efficiency silicon PERT cells on MCZ substrates and 24.7% efficiency PERL cells on FZ Substrates*, Progress in Photovoltaics, Research and Applications, 1999, 7, 471–474.
- [9] GREEN M.A., *The path to 25% silicon solar cell efficiency: history of silicon cell evolution*, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2009, 7, 183–189.
- [10] TAGUCHI M., KAWAMOTO K., TSUGE S., BABA T., SAKATA H., MORIZANE M., UCHIHASHI K., NAKAMURA N., KIYAMA S., OOTA O., *HITTM Cells - High Efficiency Crystalline Si Cells with Novel Structure*, Prog. Photovolt: Res. Appl., 2000, 8, 503–513.
- [11] GREEN M.A., EMERY K., HISHIKAWA Y., WARTA W., DUNLOP E.D., *Prog. Photovolt: Res. Appl. Prog. Photovolt: Res. Appl.* 2016, 24, 905–913.
- [12] SHOCKLEY W., QUEISSER H.J.J., *Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells*, Journal of Applied Physics, 1961, 32, 510–519.
- [13] TIEDJE T., YABLONOVITCH E., CODY G.D., BROOKS B.G., *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1984, Vol. 31, ed. no. 5, 711–716.
- [14] GREEN M.A., *Third generation photovoltaics: advanced solar electricity conversion*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2006.
- [15] GREEN M.A., *Recent developments and future prospects for third generation and other advanced cells*, Proc. of the IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Hawaii, 7–12 May 2006, 15–19.
- [16] CHO E.-C., GREEN M.A., CONIBEER G. et al., *Silicon quantum dots in a dielectric matrix for all-silicon tandem solar cells*, Hindwai Publishing Corporation, Advances in OptoElectronics 2007, 1–11.
- [17] FONASH S.J., *Solar Cell Device Physics*, Elsevier Inc., 2010.
- [18] GREEN M.A., *Photovoltaic principles*, Physica E, 2002, 14, 11–17.
- [19] MARKVART T., *Principles of Solar Cell Operation in Solar Cells, Materials, Manufacture and Operation*, ed. by MARKVART T. CASTAÑER L., Elsevier, 2005.
- [20] IFTIQUAR S.M., LEE Y., DAO V.A., KIM S., YI J., *High efficiency heterojunction with intrinsic thin layer solar cell: A short review Materials and processes for energy: communicating current research and technological developments*, [in:] Materials and processes for energy: communicating current research and technological developments Editor: A. Mendez-Vilas, ISBN: 978, publisher: Formatex Research Center, 2013, 59–67.

- [21] DUPRÉ O., VAILLON R., GREEN M.A., *Physics of the temperature coefficients of solar cells*, Solar Energy Materials & Solar Cells, 2015, 140, 92–100.
- [22] WURFEL P., *The chemical potential of radiation*, J. Phys. C Solid State Phys., 1982, 15, 3967–3985.
- [23] HIRST L.C., EKINS-DAUKES N.J., *Fundamental losses in solar cells*, Prog. Photovolt. Res. Appl. 2011, 19, 286–293.
- [24] VARSHNI Y.P., *Temperature dependence of the energy gap in semiconductors*, Physica, 1967, 34(1), 149–154.
- [25] YU C., CHEN Z., WANG J.J., PFENNINGER W., VOCKIC N., KENNEY J.T. et al., *Temperature dependence of the band gap of perovskite semiconductor compound CsSnI₃*, J. Appl. Phys., 2011, 110, 063526.
- [26] WU K., BERA A., MAC., DUY., YANG Y., LI L. et al., *Temperature-dependent excitonic photoluminescence of hybrid organometal halide perovskite films*, Phys. Chem. Chem. Phys. 2014, 16, 22476–22481.
- [27] SZE S.M., *Physics of Semiconductor Devices*, 2nd edition. John Wiley & Sons, New York.
- [28] CHARLES J.-P., MEKKAOU-ALAOUI I., BORDURE G., MIALHE P., *Solid-State Electronics*, 1985, 28, 807–820.
- [29] EMERY K.A., OSTERWALD C.R., *PV performance measurement algorithms, procedures and equipment*, IEEE, 1990, 1068–1073.
- [30] HISHIKAWA Y., IMURA Y., OSHIRO T., *Irradiance dependence and translation of the I-V characteristics of crystalline silicon solar cell*, Proc. 28th Photovoltaic Specialists Conf., Anchorage, 1464-1467.
- [31] PHILIPS J.E., TITUS J., HOFMANN D., *Determining the voltage dependence of the light generated current in CuInSe₂-based solar cells using I-V measurements made at different light intensities*, Proc. 26th IEEE Photovoltaic Specialist Conf., Anaheim, 1997, 463–466.
- [32] HEGEDYS S.S., *Current-Voltage Analysis of a-Si and a-SiGe Solar Cells Including Voltage-dependent Photocurrent Collection*, S.S. Hegedus, Progress in Photovoltaics, 1997, 5, 151–168.
- [33] FRIESEN G., OSSENBRINK H.A., *Capacitance effects in high – efficiency cells*, Solar Energy Materials and Solar Cells, 1997, 48, 77–83.
- [34] ŽDANOWICZ T., *The interactive computer program to fit I-V curves of solar cells*, 12th European Photovoltaic Solar Conference, 11–15 April, 1994, 1311–1314.
- [35] Chan D.S.H., Philips J.R., Phang J.C.H., *A comparative study of extraction methods for solar cell model parameters*, Solid-State Electronics, 29, 1986, 329–337.
- [36] Shi K., Dong J., Lv S., Xu Y., Zhu L., Xiao J., Xu Xin, Wu H., Li D., Luo Y., Meng Q., *Hole – conductor – free perovskite organic lead iodide heterojunction thin –film solar cell: High efficiency and junction property*, Applied Physics letters, 2014, 104, 063901-1.
- [37] ORTIZ-CONDE A. et al., *New method to extract the model parameters of solar cells from the explicit analytic solutions of their illuminated IV characteristics*, Solar Energy Materials and Solar Cells, 2006, 90, 352.
- [38] ZHANG C. et al., *A simple and efficient solar cell parameter extraction method from a single current-voltage curve*, J. Appl. Phys., 2011, 110, 064504.
- [39] DAWIDOWSKI W., ŚCIANA B., ZBOROWSKA-LINDERT I., MIKOLÁŠEK M., BIELAK K., BADURA M., PUCICKI D., RADZIEWICZ D., KOVÁČ J., TŁACZAŁA M., *The influence of top electrode of InGaAsN/GaAs solar cell on their electrical parameters extracted from illuminated I-V characteristics*, Solid-State Electronics, 2016, 120, 13–18.
- [40] WOLF M., RAUSCHENBACHT H., *Series resistance effects on solar cell measurements*, Advanced Energy Conversion, Pergamon Press, Printed in Great Britain, 1963, 3, 455–479.
- [41] SINTON R., CUEVAS A., *A quasi –steady open-circuit voltage method for solar cell characterization*, Proc. 16th European Photovoltaic Solar Energy Conf., Glasgow, 2000, 1152–1155.

- [42] KERR M.J., CUEVAS A., SINTON R.A., *Generalized analysis of quasi-steady-state and transient decay open circuit voltage measurements*, Journal of Applied Physics, 2002, 91, 399–404.
- [43] GREEN M.A., *Solar Cells: Operating Principles, Technology, and System Applications*, University of New South Wales, Kensington, 1986.
- [44] GREEN M.A., EMERY K., BLAKERS A.W., *Silicon solar cells with reduced temperature sensitivity*, Electronics Letters, 1982, 2, 97–98.
- [45] GREEN A.M., *General temperature dependence of solar cell performance and implications for device modelling*, Prog. Photovolt: Res. Appl. 2003, 11, 333–340.
- [46] PANEK P., LIPIŃSKI M., BÉLTOWSKA-LEHMAN E., DRABCZYK K., CIACH R., *Industrial technology of multicrystalline silicon solar cells*, Opto-Electronics Review, 2003, 11, 269–275.
- [47] LIPIŃSKI M., ZIĘBA P., KAMIŃSKI A., *Crystalline silicon solar cells*, [in:] K.J. Kurzydłowski, B. Major and P. Zięba (eds.), Foundation of Materials Design (Research Signopost 37/661 (2) Fort P.O., Trivandrum-695 023, Kerala, India, 2006, 285–308.
- [48] LIPIŃSKI M., PANEK P., KLUSKA S., ZIĘBA P., SZYSZKA A., PASZKIEWICZ B., *Defect passivation of multicrystalline silicon solar cells by silicon nitride coatings*, Materials Science, 2006, 24, 1009–1016.
- [49] LIPIŃSKI M., *Silicon nitride for photovoltaic application*, Archives of Materials Science and Engineering, 2010, 46, 69–87.
- [50] LEE M.M., TEUSCHER J., MIYASAKA T., MURAKAMI T.N., SNAITH H.J., *Efficient Hybrid Solar Cells Based on Meso-Superstructured Organometal Halide Perovskites*, Science, 2012, 338, 643–647.
- [51] HEO J.H., IM S.H., NOH J.H., MANDAL T.N., LIM CH-S., CHANG J.A., LEE Y.H., KIM H.I.-J., SARKAR A., NAZEERUDDIN M.D.K., GRATZEL M., SEOK S.I., *Efficient inorganic–organic hybrid heterojunction solar cells containing perovskite compound and polymeric hole conductors*, Nature Photonics, 2013, 7, 486–491.
- [52] MALINKIEWICZ O., YELLA A., LEE Y.H., ESPALLARGAS G.M., GRAETZEL M., NAZEERUDDIN M.K. BOLINK H.J., *Nature Photonics*, 2014, 8, 128–132.
- [53] DOCAMPO P., BALL J.M., DARWICH M., EPERON G.E., SNAITH H.J., *Efficient organometal trihalide perovskite planar – heterojunction solar cells on flexible polymer substrates*, Nature Commun., 2013, 4, 1–6.
- [54] BURSCHKA J. et al. *Sequential deposition as a route to high-performance perovskite-sensitized solar cells*, Nature, 2013, 499, 316–319.
- [55] LIPIŃSKI M., GAWLIŃSKA K., STAROWICZ Z., DRABCZYK K., PIOTROWSKI T., *Badania ogniw perowskitowych*, Elektronika, 2016, 7, 15–17.
- [56] PN-EN 60904-9:2008 – *Elementy fotowoltaiczne – Część 9: Wymagania dla symulatorów promieniowania słonecznego*.
- [57] FAKHFOURI V., HERRMANN W., ZAAIMAN W., DREIER C., DROZ C., MORITA K., JOHNSON L., *26th EU-PVSEC, Uncertainty assessment of PV power measurement in industrial environments*, 3408–3412.
- [58] PN-EN 60904-7:2009 – *Elementy fotowoltaiczne – Część 7: Obliczanie korekty niedopasowania spektralnego w pomiarach elementów fotowoltaicznych*.
- [59] BASORE P.A., CLUGSTO D.A., *PCID version 4 for windows: from analysis to design*, Proc. of the 25th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, USA, 13–17 May, 1996, 377–381.
- [60] GREEN M.A., EMERY K., HISHIKAWA Y., WARTA W., DUNLOP E.D., *Solar cell efficiency tables (version 46)*, Progress in Photovoltaics Res. Appl., 2015, 23, 805–812.
- [61] GREEN M.A., EMERY K., HISHIKAWA Y., WARTA W., DUNLOP E.D., *Solar cell efficiency tables (version 46)*, Progress in Photovoltaics Res. Appl., 2015, 23, 1–9.
- [62] SNAITH H.J., *How should you measure your excitonic solar cells?* Energy Environ. Sci., 2012, 5, 6513–6520.

- [63] *Wyrażanie niepewności pomiaru*, Przewodnik, Główny Urząd Miar, Warszawa 1999
- [64] SHAO Y.H., XIAO Z.G., BI C., YUAN Y.B., HUANG J.S., *Origin and elimination of photocurrent hysteresis by fullerene passivation in $CH_3NH_3PbI_3$ planar heterojunction solar cells*, Nat. Commun. 2014, 5, 5784.
- [65] SANCHEZ R.S., GONZALEZ-PEDRO V., LEE J.-W., PARK N.-G., KANG Y.S., MORA-SERO I., BISQUERT J., *Slow dynamic processes in lead halide perovskite solar cells. Characteristic times and hysteresis*, J. Phys. Chem., Lett., 2014, 5, 2357–2363.
- [66] KIM H.-S., JANG I.-H., N., CHOI M., GUERRRO A., BISQUERT J., PARK N.-G., *Control of I-V hysteresis in $CH_3NH_3PbI_3$ perovskite solar cell*, J. Phys. Chem. Lett., 2015, 6, 4633–4639.
- [67] LIU C., FAN J., ZHANG X., SHEN Y., YANG L., MAI Y., *Hysteretic behaviour upon light soaking in perovskite solar cells prepared via modified vapour-assisted solution process*, ACS Appl. Mater. Interfaces, 2015, 7, 9066–9071.
- [68] ZARAZUA I., BISQUERT J., GARCIA-BELMONTE G., *Light Induced Space Charge Accumulation Zone as photovoltaic mechanism in perovskite solar cells*, J. Phys. Chem. Lett., 2016, 7, 525–528.
- [69] SANCHEZ R.S., GONZALEZ-PEDRO V., LEE J.-W., PARK N.-G., KANG Y. S., MORA-SERO I., BISQUERT J., *Slow dynamic processes in lead halide perovskite solar cells. Characteristic times and hysteresis*, J. Phys. Chem., Lett., 2014, 5, 2357–2363.
- [70] KIM H.-S., JANG I.-H., AHN N., CHOI M., GUERRRO A., BISQUERT J., PARK N.-G., *Control of I-V hysteresis in $CH_3NH_3PbI_3$ perovskite solar cell*, J. Phys. Chem. Lett., 2015, 6, 4633–4639.
- [71] LIU C., FAN J., ZHANG X., SHEN Y., YANG L., MAI Y., *Hysteretic behaviour upon light soaking in perovskite solar cells prepared via modified vapour-assisted solution process*, ACS Appl. Mater. Interfaces, 2015, 7, 9066–9071.
- [72] FROST J.M., BUTLER K.T., WALSH A., *Molecular ferroelectric contributions to anomalous hysteresis in hybrid perovskite solar cells*, APL Mater., 2014, 2, 081506.
- [73] WEI J., ZHAO Y.C., LI H., LI G.B., PAN J.L., XU D.S., ZHAO Q., YU D.P., *Hysteresis Analysis Based on the Ferroelectric Effect in Hybrid Perovskite Solar Cells*, J. Phys. Chem. Lett., 2014, 5, 3937–3945.
- [74] VAN REENEN S., KEMERINK M., SNAITH H.J., *Modeling anomalous hysteresis in perovskite solar cells*, J. Phys. Chem. Lett. 2015, 6, 3808–3814.
- [75] TRUPKE T., BARDOS R.A., SCHUBERT M.C., WARTA W., *Photoluminescence imaging of silicon wafers*, Applied Physics Letters, 2006, 89(4), 44107.
- [76] TRUPKE T., MITCHELL B., WEBER J.W., MCMILLAN W., BARDOS R.A., KROEZE R., *Photoluminescence imaging for photovoltaic applications*, Energy Procedia, 2012, 15, 135.
- [77] GIESECKE J.A., SCHUBERT M.C., MICHL B., SCHINDLER F., WARTA W., *Minority carrier lifetime imaging of silicon wafers calibrated by quasi-steady-state photoluminescence*, Solar Energy Materials & Solar Cells, 2011, 95, 1011–1018..
- [78] TRUPKE T., NYHUS J., HAUNSCHILD J., *Luminescence imaging for inline characterisation in silicon photovoltaics*, Phys. Status Solidi RRL, 2011, 5, 131–137.
- [79] AUGARTEN Y., TRUPKE T., LENIO M., BAUER J., WEBER J.W., JUHL M., KASEMANN M., BREITENSTEIN O., *Calculation of quantitative shunt values using photoluminescence imaging*, Prog. Photovolt: Res. Appl., 2013, 21, 933–941.
- [80] GLATTHAAR M., HAUNSCHILD J., ZEIDLER R., DEMANT M., GREULICH J., MICHL B., WARTA W., REIN S., PREU R., *Evaluating luminescence based voltage images of silicon solar cells*, Journal of Applied Physics, 2010, 108, 014501-1-(5).
- [81] HAMEIRI Z., SOUFIANI A.M., JUHL M.K., JIANG L., HUANG F., CHENG Y.-B., KAMPWERTH H., WEBER J.W., GREEN M.A., TRUPKE T., *Photoluminescence and electro-luminescence imaging of perovskite solar cells*, Prog. Photovolt: Res. Appl., 2015, 23, 1697–1705.
- [82] LIPÍŃSKI M., KULESZA G., STAROWICZ Z., *Obrazowane luminescencyjne do charakteryzacji ogniw i modułów fotowoltaicznych*, Elektronika, 2014, 8, 52–54.

- [83] DRABCZYK K., KULESZA-MATLAK G., DRYGAŁA A., SZINDLER M., LIPIŃSKI M., *Electroluminescence imaging for determining the influence of metallization parameters for solar cell metal contacts*, Solar Energy, 2016, 126, 14–21.

CHARACTERISATION OF SOLAR CELLS

We present the main problems of solar cells characterization. Two type of cells are characterized: silicon solar cells and perovskite solar cells fabricated in Photovoltaic Laboratory of IMMS PAS in Kozy. We showed the spectral mismatch, the I-V hysteresis effect of perovskite cells and the influence of the temperature on the parameters. The hysteresis effects are not fully explained yet. We tested three models to fit the I-V characteristics of silicon and perovskite solar cells. The quality factors of the diodes are very large, which indicates that the mechanisms of the carriers transport and recombination are different from those in the silicon solar cells. The paper presents the method for characterization of solar cells and photovoltaic modules using photo- and electroluminescent imaging as well. These method allows to identify the various types of defects as micro-cracks, contacts damage and different faults in the production process. However, these type of characterisation is still under development in order to obtain qualitative as well as quantitative characterization.

Urszula BŁASZCZAK*, Maciej ZAJKOWSKI*,
Andrzej ZAJĄC*

WYBRANE ZAGADNIENIA PROJEKTOWANIA I OCENY JAKOŚCI URZĄDZEŃ OŚWIETLENIOWYCH ZE ŹRÓDŁAMI PÓLPRZEWODNIKOWYMI

Celem niniejszego rozdziału jest przedstawienie wybranych zagadnień związanych z powszechnym stosowaniem źródeł półprzewodnikowych w oświetleniu. Omówione zostały niektóre problemy wynikające z niedopasowania aktualnej praktyki projektowej i metrologicznej wynikające z upowszechnienia diod elektroluminescencyjnych. Problemy te stanowią przyczynę, dla której nowoczesna technika świetlna musi zostać przeddefiniowana. Zmiany te są szczególnie intensywne w ostatnich latach.

Półprzewodnikowe źródła światła stworzyły potencjał zarówno dla znacznych oszczędności energii, jak i wielu nowatorskich rozwiązań oświetleniowych. Przedstawione zostaną przykładowe rozwiązania opracowanych urządzeń oświetleniowych przeznaczonych do oświetlenia ewakuacyjnego oraz ogólnego – oprawa ewakuacyjna o zmiennej treści oraz oprawa o zmiennej temperaturze barwowej i wysokich wskaźnikach oddawania barw oraz zabezpieczeniem przeciwolśnieniowym.

1. WSTĘP

Oświetlenie jest uznawane za podstawowy składnik w ograniczaniu zużycia energii, czego skutkiem jest przejście od tradycyjnych źródeł światła do źródeł półprzewodnikowych. Jednakże kwestie związane z efektywnością energetyczną budynków i instalacji oświetleniowych to tylko fragment potencjału tkwiącego w źródłach półprzewodnikowych. Upatruje się go w możliwości elastycznego i relatywnie prostego sterowania parametrami kolorymetrycznymi, a także w oddziaływaniu pozawzrokowym przez aplikacje związane z oddziaływaniem na zdrowie człowieka, jego

* Katedra Elektroenergetyki, Fotoniki i Techniki Świetlnej, Wydział Elektryczny, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45D, 15-351 Białystok.

czujność, nastrój itd., co finalnie również przekłada się na efekt finansowy związany z wykonywaną pracą.

Wyniki badań prowadzonych na przestrzeni ostatnich 15–20 lat pozwoliły lepiej zrozumieć, w jaki sposób światło oddziałuje na człowieka, wskutek czego narodziła się idea tzw. *Human Centric Lighting* [1]. Zakłada ona, że oświetlenie powinno uwzględniać, poza znanymi dotychczas aspektami ilościowymi i jakościowymi, nowe cele – stworzenie środowiska, które będzie pozytywnie oddziaływać na zdrowie człowieka, jego produktywność, nastrój. Równocześnie oczywiste stało się, że wiele aspektów oświetlenia (np. takie jego cechy, jak: olśnienie, tętnienie, wskaźnik oddawania barw) należy zdefiniować na nowo, ponieważ dotychczasowe metody ich opisu ilościowego nie znajdują odzwierciedlenia w rzeczywistej (ocenianej przez ludzi) jakości oświetlenia i prowadzą w wielu sytuacjach do błędnych wniosków.

Celem niniejszego opracowania jest przedstawienie aktualnego spojrzenia na wybrane zagadnienia z zakresu techniki świetlnej, związane i wynikające z zastosowania diod elektroluminescencyjnych w oświetleniu. Omówione zostaną wnioski z aktualnie prowadzonych na świecie badań nad korektą wskaźnika służącego ocenie jakości oddawania barw. Czynnikiem ten jest uzależniony od spektralnego rozkładu promieniowania źródła, nie jest powiązany z charakterem rozsyłu promieniowania. Możliwość modelowania wypadkowego rozkładu spektralnego to jedna z głównych zalet aplikacyjnych diod elektroluminescencyjnych. Oprócz zmian w sposobie charakteryzacji kolorymetrycznej, przedstawione zostaną wnioski z badań prowadzonych w wielu ośrodkach na świecie nad skutkami stosowania diod elektroluminescencyjnych dla opisu liczbowego olśnienia. Zmiany te są konieczne, ponieważ charakter rozsyłu promieniowania przez diody jest zupełnie inny niż dotychczas stosowanych źródeł światła, co w efekcie prowadzi do odmiennej percepcji tego promieniowania.

2. WYBRANE WYMAGANIA W PROJEKTOWANIU I METROLOGII SPRZĘTU OŚWIETLENIOWEGO W ERZE ŹRÓDEŁ PÓŁPRZEWODNIKOWYCH

Kształtowanie rozsyłu strumienia świetlnego z opraw oświetleniowych jest zadaniem skomplikowanym, w którym analizować należy wiele czynników – poczynając od emisji przestrzennej, przez problem rozkładu luminancji, który ma decydujące znaczenie podczas określania wskaźnika olśnienia UGR, a kończąc na nowym problemie zapewnienia właściwego wskaźnika oddawania barw i jego rozkładu, a także sposobu sterowania rozsyłem [2]. Projektanci zwracają uwagę jednak głównie na kształt bryły światłości, luminancja zaś widocznej powierzchni oprawy jest praktycznie analizowana dopiero na końcu procesu projektowego. Zastosowanie źródeł półprzewodnikowych LED daje przesłanki do prostszego procesu projektowania (źródło

quasi-punktowe), jednak pod rygorem ograniczania wysokiej luminancji źródła. Problem staje się istotniejszy, gdy założona konfiguracja całego układu świetlno-optycznego, złożonego ze źródeł LED i elementu optycznego (odbłyśnika lub soczewki), jest zmieniona w procesie produkcyjnym w sposób niezamierzony ze względu na niedokładności wykonania poszczególnych elementów optycznych lub niewystarczającą dokładność ich montażu. W konwencjonalnych źródłach o względnie większych rozmiarach niż diody elektroluminescencyjne różnice we wzajemnym pozycjonowaniu rzędu części milimetra nie wprowadzają praktycznie żadnych różnic między efektem zamierzonym a osiągniętym. Układy świetlno-optyczne z diodami LED i „mikrooptyką” wymuszają precyzję i dokładność wzajemnego ustawienia poszczególnych elementów oprawy. Pierwszą zauważalną konsekwencją jest zmiana profilu krzywej światłości oraz światłości osiowej [3], które prowadzą między innymi do zmiany wskaźnika oślnienia *UGR*.

2.1. PODSTAWOWE CECHY ŚWIETLNE ŹRÓDEŁ I OPRAW

2.1.1. ROZSYŁ PRZESTRZENNY PROMIENIOWANIA I JEGO FORMOWANIE NA POTRZEBY TECHNIKI ŚWIETLNEJ

Do grupy źródeł, których krzywe światłości opisane są prostymi wzorami analitycznymi, można zaliczyć promienniki elementarne (rys. 1). Dla promienników elementarnych strumień świetlny oraz równania opisujące rozkład światła są następujące:

a) powierzchnia świecąca zgodnie z prawem Lamberta

$$I_{\alpha} = I_{\max} \cos \alpha \quad (1)$$

$$\Phi = \pi \cdot I_{\max} \quad (2)$$

gdzie:

I_{\max} – maksymalna wartość światłości,

I_{α} – światłość promieniowana pod kątem α ,

Φ – całkowity strumień świetlny.

b) punkt świetlny

$$I_{\alpha} = I_{\max} \cos \alpha \quad (3)$$

$$\Phi = 4\pi \cdot I_{\max} \quad (4)$$

c) powierzchnia półsferyczna

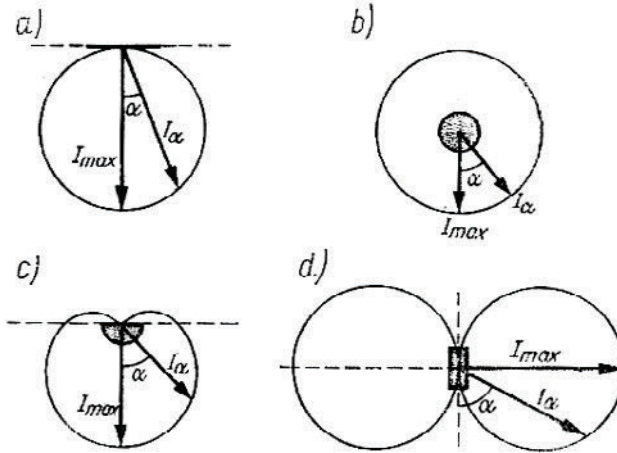
$$I_{\alpha} = I_{\max} \frac{1 + \cos \alpha}{2} \quad (5)$$

$$\Phi = 2\pi \cdot I_{\max} \quad (6)$$

d) linia świetlna

$$I_{\alpha} = I_{\max} \sin \alpha \quad (7)$$

$$\Phi = \pi^2 \cdot I_{\max} \quad (8)$$

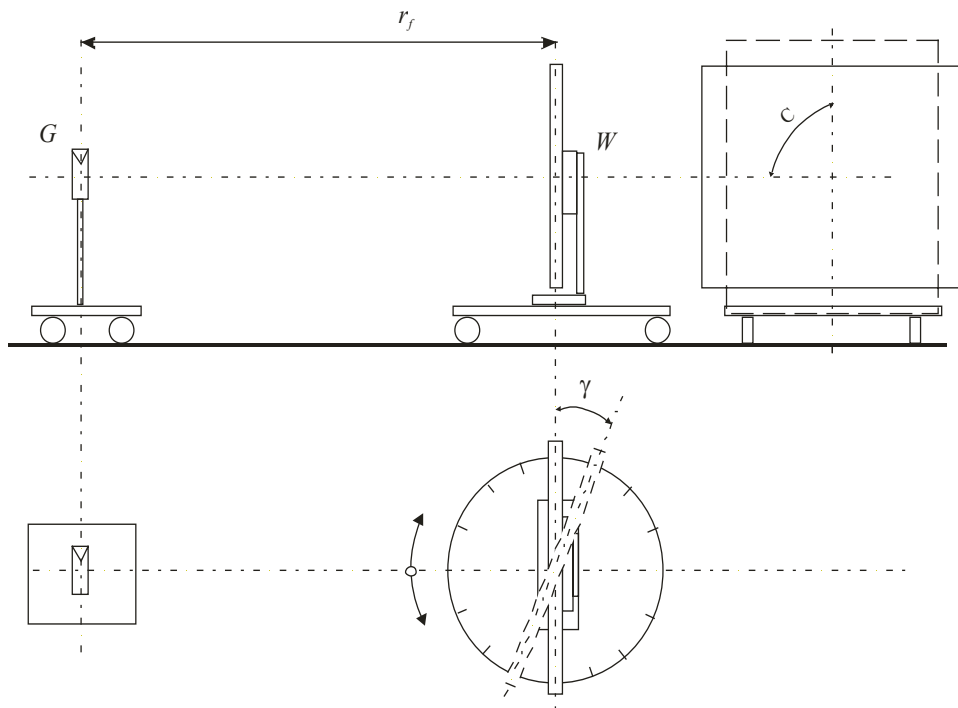


Rys. 1. Krzywe światłości promienników elementarnych:
a – powierzchnia świecąca w sposób Lambertowski, b – punkt świetlny,
c – powierzchnia półsferyczna, d – linia świetlna

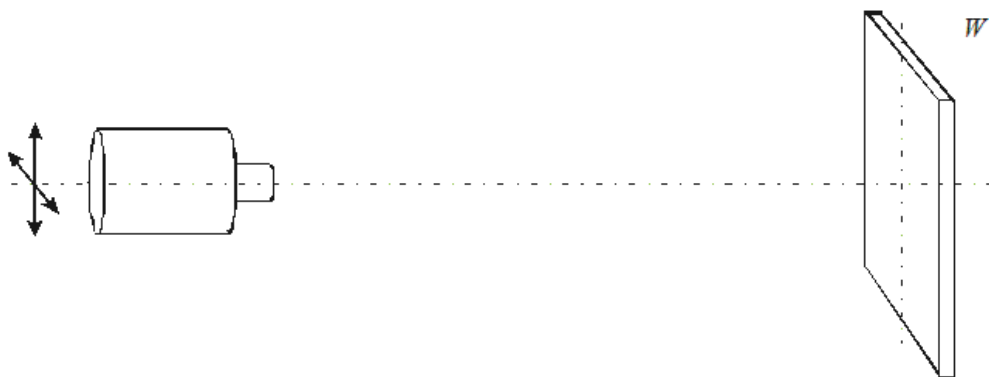
Fig. 1. Luminous intensity curves for elementary radiators:
a – lambertian surface, b – point source, c – semi-spherical surface, d – line source

O przydatności źródła światła do celów oświetleniowych decyduje jego krzywa światłości i strumień świetlny. Wskutek upowszechnienia diod elektroluminescencyjnych należało zmodyfikować typowe, znane techniki pomiaru ich właściwości fotometrycznych [4, 5]; niektóre z zagadnień są aktualnie przedmiotem prac, jak np. metody charakteryzowania rozsyłu strumienia za pomocą goniometrów CCD.

Podczas projektowania oprawy konieczne jest zdefiniowanie sposobu rozsyłu promieniowania ze źródła, który ma być formowany za pomocą elementów optycznych. Zarówno sposób rozsyłu strumienia świetlnego, jak również jego charakterystyka ilościowa mogą być przedstawiane w kartach katalogowych diod, modułów i paneli z emiterami półprzewodnikowymi. W sytuacji, gdy producent nie określi przestrzennej dystrybucji strumienia świetlnego bądź to przez prezentację wykresu rozsyłu światłości, bądź przez dostęp do pliku fotometrycznego w formacie EULUMData lub IES, należy określić bryłę światłości na stanowisku goniometrycznym. Głowica fotometru musi być usytuowana osiowo względem badanego emitera, w znanej odległości fotometrowania. Minimalna odległość fotometrowania r_f jest zależna od rozmiaru powierzchni świecącej emitera.

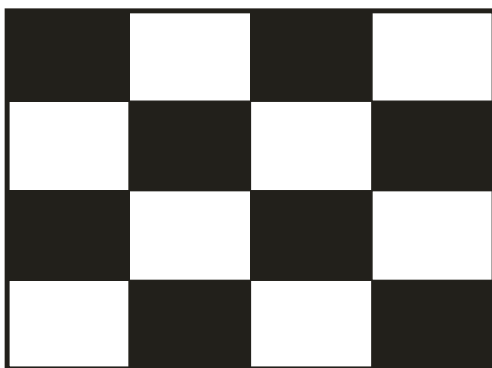


Rys. 2. Schemat stanowiska do wyznaczania rozsyłu strumienia świetlnego metodą goniometryczną
 (G – głowica fotometryczna, W – emiter promieniowania (oprawa oświetleniowa),
 r_f – odległość fotometryczna, C – płaszczyzna fotometryczna, γ – kąt fotometryczny)
 Fig. 2. Scheme of the stand for luminous flux distribution measurement by goniophotometric methods
 (G – photometric head, W – light emitter (luminaire), r_f – photometric distance,
 C – photometric surface, γ – photometric angle)



Rys. 3. Schemat stanowiska do wyznaczania rozkładu luminancji i kontrastu luminancji (W – emiter)
 Fig. 3. Scheme of the stand for luminance distribution and luminance contrast measurement (W – emitter)

Wyznaczenie kąтового rozkładu luminancji można przeprowadzić na stanowisku analogicznym do tego przedstawionego na rysunku 2, ale zamiast głowicy fotometrycznej G (w postaci luksomierza skorygowanego przestrzennie i widmowo do krzywej $V(\lambda)$) stosuje się miernik luminancji. Cechą pożądaną w przypadku powierzchniowych emiterów promieniowania jest równomierność luminancji. Pomiaru dokonuje się na stanowisku (rys. 3) wykorzystującym miernik luminancji (lub głowicę luminacyjną), która porusza się w płaszczyźnie równoległej do płaszczyzny emitera, a głowica skierowana jest prostopadle do powierzchni świecącej [6].



Rys. 4. Przedmiot testowy do wyznaczania kontrastu luminancji metodą ANSI
Fig. 4. Test object for measurements of luminance contrast according to ANSI

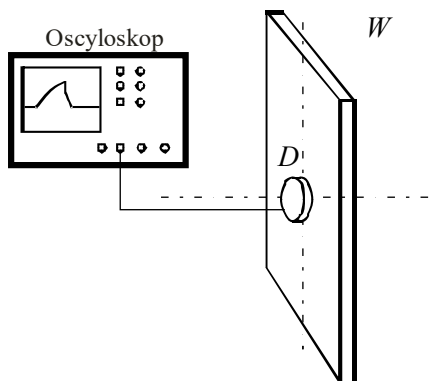
Producenci wyświetlaczy półprzewodnikowych podają również parametr określany jako kontrast, którego pomiary można przeprowadzić metodą ANSI (rys. 4) oraz standardową metodą pomiaru całkowicie „białego” i całkowicie „czarnego” ekranu LCD (tzw. metoda „on/off”).

Pomiary powierzchniowego rozkładu luminancji, kontrastu luminacji oraz luminancji kątowej, zgodnie z normą ISO 13406-2 [7] zastąpioną przez normę PN-EN ISO 9241-305:2009 [8], powinny być przeprowadzone w trzech warunkach oświetleniowych: w ciemni fotometrycznej, gdy średnie natężenie oświetlenia wynosi 500 lx oraz, gdy średnie natężenie oświetlenia wynosi 10 000 lx. Odpowiadać ma to sytuacji, gdy praca z monitorem LCD odbywa się w standardowych warunkach oświetleniowych wynikających ze specyfiki pracy biurowej oraz w warunkach terenowych przy nasłonecznieniu.

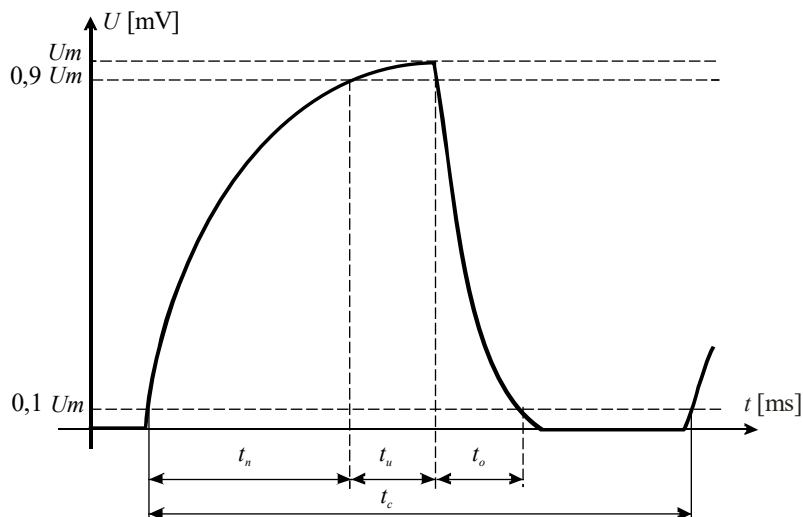
Jednym z parametrów emiterów wykorzystujących technologie LCD, DLP czy OLED jest czas reakcji, który wynika z badań oscyloskopowych emitera i polega na odczytywaniu z oscylogramu (rys. 5) czasów wynikających z poziomów $0,1 U_m$ i $0,9 U_m$ napięcia maksymalnego U_m (rys. 6):

- t_n – czas narastania impulsu,
- t_o – czas opadania impulsu,

t_c – całkowity czas trwania impulsu,
 t_u – czas stabilizacji impulsu.



Rys. 5. Schemat stanowiska do wyznaczania czasu reakcji wyświetlacza LCD
 Fig. 5. Scheme of the stand for measurement of the LCD display response time



Rys. 6. Wielkości do wyznaczenia czasu reakcji wyświetlacza
 Fig. 6. Quantities for measurement of the reaction time of the display

2.1.2. NOWE PODEJŚCIE DO OCENY BARWY ŚWIATŁA

Każde źródło światła emituje promieniowanie o określonym rozkładzie spektralnym, który jest pochodną metody wytwarzania tego światła. W przypadku źródeł półprzewodnikowych wykorzystywane jest zjawisko luminescencji (diody LED i OLED) lub generacji promieniowania koherentnego (lasery półprzewodnikowe). W chwili

obecnej w oświetleniu wnętrz zastosowanie znajduje pierwsza grupa źródeł – oprawy z laserami półprzewodnikowymi stosowane są w niektórych modelach samochodów osobowych w celu uzyskania efektów specjalnych w oświetleniu scenicznym i iluminacji obiektów.

Wykorzystywane w oświetleniu źródła półprzewodnikowe to głównie diody emitujące światło białe, dzięki oddziaływaniu diody niebieskiej na luminofor. Spotyka się także rozwiązania bazujące na diodach RGB, znacznie rzadziej systemy hybrydowe (światłówki i diody białe lub barwne) umożliwiające regulację temperatury barwowej.

Rozważania na temat podstawowych parametrów barwowych źródeł światła przedstawione zostały w [9], gdzie omówiono szczegółowo metodę wyznaczania wskaźnika oddawania barw R_a . Zwrócono wówczas uwagę na powszechnie już znany problem niedopasowania tej metody do oceny źródeł półprzewodnikowych. W efekcie w roku 2017 Międzynarodowa Komisja Oświetleniowa CIE przyjęła nową metodę oceny światła emitowanego przez źródła stosowane do oświetlania, w której wyznacza się wskaźnik „wierności” R_f [10] (analogiczny do metody z normy IES TM-30-15 z 2015 r. [11]):

$$R_f = 10 \ln \left(e^{\frac{(100 - c_f \Delta \bar{E})}{10}} + 1 \right) \quad (9)$$

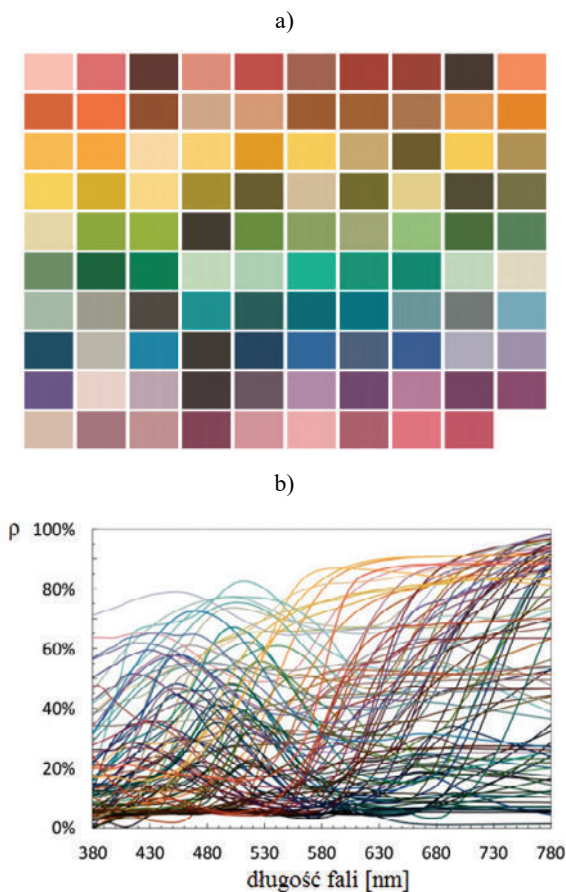
na podstawie wartości wskaźników szczegółowych:

$$R_{fi} = 10 \ln \left(e^{\frac{(100 - c_f \Delta E_i)}{10}} + 1 \right) \quad (10)$$

gdzie c_f jest współczynnikiem skali wynoszącym 6,73, ΔE_i to różnice barwy poszczególnych próbek, a $\Delta \bar{E}$ ich wartość średnia.

Należy podkreślić, że metoda ta nie ma odzwierciedlenia w żadnych europejskich rozporządzeniach obligujących producentów do oceny barwy światła produkowanych źródeł – odbywa się to nadal metodą ze wskaźnikiem oddawania barw R_a (CRI) [12]. Ponadto w języku polskim dotychczas formalnie nie funkcjonuje określenie dla wskaźnika R_f .

Istotną różnicą w metodzie R_f względem R_a jest aktualizacja metody obliczania różnic barw, w szczególności przestrzeni barw obiektu i zastosowanie 99 próbek barwnych i bieli (rys.7). Próbki te zapewniają bardziej jednolite rozmieszczenie ich charakterystyk spektralnych (także ich kształtu) w funkcji długości fali, a także szerzej i bardziej równomiernie rozmieszczone w trójwymiarowej przestrzeni barw. Ogólny wskaźnik „wierności” R_f wskazuje, jak blisko wygląd całego zestawu próbek (średnio) jest odtwarzany w świetle testowym w porównaniu do źródła wzorcowego.



Rys. 7. Zestaw 99 próbek barwnych (a) stosowanych do określenia różnic między źródłem badanym i źródłem odniesienia oraz ich charakterystyka spektralna (b) [13]

Fig. 7. Set of 99 color samples that are used to characterize the difference between the test source and reference illuminant [13]

2.2. WYBRANE WYMAGANIA I PROBLEMY W OŚWIETLANIU WNĘTRZ Z WYKORZYSTANIEM ŹRÓDEŁ PÓLPRZEWODNIKOWYCH

Wymagania oświetleniowe wymienione w normach są kompendium podstawowych potrzeb człowieka w zakresie pracy wzrokowej:

- komfortu widzenia – gdy pracownicy mają dobre samopoczucie, w pośredni sposób wpływa to także na większą wydajność pracy i lepszą jej jakość;
- wydolności wzrokowej – gdy pracownicy są w stanie wykonywać swoje zadania wzrokowe, nawet w trudnych warunkach i w dłuższych okresach;
- bezpieczeństwa.

Zapewnienie podanych potrzeb jest możliwe, gdy poza odpowiednim doborem źródeł i opraw uwzględnione są wytyczne dotyczące właściwości samych pomieszczeń, takie jak współczynniki odbicia światła od powierzchni. Odpowiadają one bezpośrednio za rozkład luminancji w polu pracy wzrokowej.

2.2.1. OŚWIETLENIE STANOWISK PRACY WE WNĘTRZACH

Wymagania oświetleniowe w zakresie oświetlenia wewnątrz regulowane są w normie dla oświetlenia elektrycznego PN-EN 12464-1:2012 „Światło i oświetlenie. Oświetlenie miejsc pracy. Część 1: Miejsca pracy we wnętrzach” [14]. Określa ona minimalne natężenie oświetlenia uzyskiwanego dla instalacji oświetlenia elektrycznego na różnych stanowiskach pracy i nauki oraz inne równie istotne parametry oświetlenia. Natężenie oświetlenia jest to wielkość podstawowa, technika jej pomiaru jest najprostsza, a urządzenia dostępne i niedrogie. Pozostałe wymienione wskaźniki to wskaźnik oddawania barw R_a oraz wskaźnik UGR . Pierwszy wskaźnik dotyczy źródła światła i wynika z jego charakterystyki spektralnej, której pomiary nie stanowią większego problemu. Ma on informować o poprawności postrzegania barwy obiektów przy oświetleniu danym źródłem, co w wielu przypadkach jest czynnikiem krytycznym w wykonywanej pracy. Jak wspomniano w poprzednim rozdziale, metoda ta jest niewłaściwa dla źródeł półprzewodnikowych ze względu na kształt ich charakterystyki spektralnej, jednak nowa metoda na razie nie funkcjonuje w krajach europejskich w praktyce inżynierskiej, a jedynie w zastosowaniach naukowych. Stąd projektowanie i konstrukcja sprzętu oświetleniowego może bazować na nowym wskaźniku, ale nie musi. Znamienne jest, że rozkład spektralny o wysokim wskaźniku R_f zawsze ma wysoką wartość R_a , ale korelacja odwrotna nie jest oczywista, szczególnie w przypadku źródeł, których charakterystyka nie jest „gładka” i w wybranych obszarach widma nie jest wypełniona. Można przyjąć, że rozkład spektralny naśladujący promiennik Plancka będzie się charakteryzował wysokim wskaźnikiem jakości oddawania barwy niezależnie od przyjętej metody, natomiast w przypadku źródeł o charakterystyce takiej jak dioda elektroluminescencyjna różnice mogą być bardzo znaczące.

Drugi wskaźnik można uznać za pewną miarę jakości zapewnienia rozkładów luminancji w polu pracy wzrokowej. Luminancja jest wielkością kierunkową, charakteryzującą powierzchnie obiektów, rozpoznawaną przez układ wzrokowy człowieka. Definiowana jest ona jako iloraz elementarnej światłości dI_α w kierunku obserwatora, jaką emituje w tym kierunku bardzo mały element dS powierzchni do wielkości pozornej tego fragmentu powierzchni:

$$L_\alpha = \frac{dI_\alpha}{dS_\alpha \cos \alpha} = \frac{d^2\Phi}{dS_\alpha d\omega \cos \alpha} \quad (11)$$

W normie wskazano wielkość pochodną względem rozkładu luminancji w postaci wskaźnika UGR , niestety pomiar tej wielkości jest nadal zagadnieniem problematycznym

nym, nawet w przypadku tradycyjnych źródeł światła. Przyczyną jest brak realnie dostępnych (przystępnych cenowo) urządzeń pomiarowych umożliwiających pomiar UGR , a modele dostępne są bardzo drogie i skomplikowane w obsłudze. Problem jest znacznie poważniejszy, jeśli wziąć pod uwagę pomiar tego wskaźnika w przypadku diod elektroluminescencyjnych – zagadnienie to jest na etapie badawczym zarówno w zakresie korelacji „nasilenie ośnienia – liczba”, jak i samej techniki pomiaru i jej ograniczeń. Aktualnie prowadzonych jest wiele badań mających na celu weryfikację stanu wiedzy na temat poprawnego sposobu oświetlania pod kątem minimalizacji ośnienia.

2.2.2. OŚNIENIE A DIODY ELEKTROLUMINESCENCYJNE

Niektóre rozwiązania oświetleniowe – pomimo zapewnienia właściwych poziomów natężenia – mogą stanowić przyczynę różnych dolegliwości, zarówno fizjologicznych jak i psychologicznych. Mówi się wówczas o tzw. ośnieniu przykrym, które stanowi jeden z aspektów oświetlenia określających jego jakość. Źródłem ośnienia są obszary o bardzo wysokiej luminancji, występujące w polu widzenia człowieka. Mogą nimi być zarówno niewłaściwie rozlokowane źródła światła, jak i bardzo jasne obszary na zewnątrz budynku. Na przestrzeni ostatnich 60 lat zaproponowano co najmniej kilka równań opracowanych na podstawie badań subiektywnych, które ułatwiały przewidywanie stopnia dyskomfortu osoby przebywającej w danych warunkach oświetleniowych, zarówno we wnętrzach jak i na zewnątrz, aby finalnie ustalić kompromis w postaci równania [15]:

$$UGR = 8 \cdot \log \left(\frac{0,25}{L_t} \sum \frac{L^2 \cdot \omega}{p^2} \right) \quad (12)$$

gdzie: L_t – luminancja tła; L – luminancja świecących części każdej oprawy w kierunku oka obserwatora; ω – kąt bryłowy, w którym oko obserwatora widzi świecące części każdej oprawy; p – wskaźnik położenia każdej oprawy ośniewającej względem kierunku obserwacji.

Wraz z upowszechnieniem diod elektroluminescencyjnych w oświetleniu zagadnienie ośnienia przykrego przybrało na wadze, głównie ze względu na specyficzne cechy tego typu źródeł – bardzo małe wymiary i bardzo wysoką luminancję. Z jednej strony wielkość tego typu emitera stwarza nowe możliwości w projektowaniu opraw, jednak istnieje niebezpieczeństwo (z powodu bardzo wysokiej luminancji LED-ów) rozwiązań charakteryzujących się znacznymi kontrastami luminancji i w efekcie zbyt wysokimi wartościami wskaźnika UGR . Zaobserwowana rozbieżność między obliczonym wskaźnikiem UGR a subiektywnie odczuwanym ośnieniem przykrym dla niektórych typów opraw dała początek wielu badaniom nad tym zjawiskiem. Wynika to przede wszystkim z wykazanego faktu istnienia różnicy między percepcją opraw o równomiernym i nierównomiernym rozkładzie luminancji, stosowana zatem w me-

todzie *UGR* średnią luminancję oprawy nie zawsze można uznać za właściwą miarę jej cech luminancyjnych. W efekcie można zauważyć dwie drogi w metodologii badań nad miarą olśnienia przykrego: modyfikacje wskaźnika *UGR* w sposób ułatwiający uwzględnienie różnorodności cech opraw z diodami oraz próby opracowania całkowicie nowego wskaźnika. Niezależnie od przyjętej drogi, wspólnym elementem jest konieczność badań oddziaływania oprawy na percepcję człowieka, które umożliwią modyfikowanie znanej lub opracowanie nowej formuły liczbowego opisu zjawiska.

Prowadzone badania prezentują bardzo zróżnicowane podejście do badania źródeł niejednorodnych – zaczynając od porównania jednorodnych opraw (luminancja oprawy stała lub z minimalnymi różnicami powierzchniowymi) z niejednorodnymi (znaczne gradienty luminancji na powierzchni świecącej oprawy), przez analizę wpływu obecności elementów optycznych na matrycy diod elektroluminescencyjnych (to *de facto* sprowadza się do analizy wpływu bryły fotometrycznej pojedynczego elementu takiej matrycy na jej percepcję) po badania wpływu cech samej matrycy (takich, jak wielkość oprawy i poszczególnych diod, odstęp pomiędzy diodami, ilość diod na jednostkę powierzchni, barwa, maksymalna, minimalna i średnia luminancja oprawy) oraz warunki pracy wzrokowej z oprawami niejednorodnymi (np. kierunek obserwacji, luminancja tła, stopień skomplikowania zadania wzrokowego). Prowadzone badania zawsze skupiają się na jednym wybranym czynniku, przy czym warto podkreślić, że na podstawie dostępnych publikacji nie można wysnuć wniosku o wpływie poszczególnych czynników w ujęciu kompleksowym, ponieważ nie ma „standardowych” warunków prowadzenia takich badań laboratoryjnych, a niekiedy autorzy korzystają z komercyjnych rozwiązań opraw. Niewątpliwie problematyka ta pozostanie otwartym zagadnieniem jeszcze przez długi okres, jeśli chodzi o potencjał badawczy, tym bardziej że problem tkwi nie tylko w czynniku charakteryzującym oprawę, lecz także wykazanej [16, 17] już konieczności modyfikacji parametru przestrzennego, jakim jest wskaźnik położenia Gutha, który według wyników podanych badań jest zróżnicowany dla różnych parametrów źródeł olśnienia. Poniżej zestawione są najważniejsze wnioski z dotychczasowych badań realizowanych w różnych ośrodkach na świecie w zakresie wpływu poszczególnych czynników na poziom wywoływanego olśnienia przykrego.

Pierwszą grupę przeanalizowanych czynników stanowią cechy oprawy (źródła olśnienia). W zakresie porównania opraw jednorodnych i niejednorodnych podstawowym mankamentem analiz jest zróżnicowana interpretacja niejednorodności (stosunek luminancji maksymalnej do minimalnej lub kontrast luminancji definiowany na różne sposoby), co utrudnia wysnuć wniosków szczegółowych, jednak wnioski ogólne takie same – oprawy niejednorodne powodują większe olśnienie niż jednorodne, zakładając taką samą średnią luminancji i wielkości oprawy [18–39]. Wykazano także, że im niższa jednorodność luminancji, tym bardziej nasilone jest zjawisko olśnienia przykrego [29], przy czym przyjmuje się, że jednorodność oprawy maleje, gdy [29, 32, 40]:

- zmniejsza się stosunek powierzchni diod do całkowitej powierzchni źródła (co obejmuje sytuacje, w których rozmiar pojedynczej diody jest mniejszy lub jest mniej diod na jednostkę powierzchni źródła),
- luminancja diod w oprawie jest większa (bezwzględnie, a także względem otoczenia w oprawie).

O strukturze luminancji oprawy decyduje także liczba diod, ich wielkość oraz rozmieszczenie. W [20–22, 29, 38, 39] autorzy dzięki dedykowanemu sterowaniu diodami utrzymywali na stałych poziomach średnie wartości luminancji opraw, dzięki czemu wykazali, że im mniejsza wielkość pojedynczej diody i ich liczba tym silniejsze oślnienie. Z kolei niektóre analizy geometrii rozmieszczenia diod w oprawie, wykorzystującej konfigurację matrycy [31, 35, 41], nie wykazały żadnych zależności nasilenia oślnienia od kątowej odległości między pojedynczymi diodami podczas kontroli zmian luminancji diod, położenia oprawy. Jednak we wcześniejszych badaniach [42] wykazano zależność odległości pomiędzy diodami podczas konfiguracji liniowej emiterów. Autorzy wykazali, że największe oślnienie występuje dla 4 cykli na stopień, a zbliżone wyniki uzyskali [34] dla bezpośredniej obserwacji. Dla widzenia peryferyjnego wykazano wpływ kątowej odległości między diodami na nasilenie oślnienia [43]. Nasuwa się wniosek, że jest to bezpośrednio powiązane z cechami siatkówki oka i jej zdolnością rozdzielczą.

Druga grupa czynników związana jest z cechami otoczenia i obejmuje wpływ kąta obserwacji. Największe różnice w natężeniu oślnienia dla opraw jednorodnych i niejednorodnych są obserwowane, gdy oprawa znajduje się w niewielkiej odległości od punktu fiksacji wzroku. Wraz z oddalaniem oprawy ku peryferiom pola widzenia różnice w ocenie oślnienia zmniejszają się – zanikają podczas oddalenia oprawy od punktu fiksacji o 30° [21, 31, 35, 42].

2.2.3. PROPOZYCJE MODYFIKACJI WSKAŹNIKA UGR

W związku z wymienionymi wynikami oczywiste stało się, że dotychczasowy sposób oceny oślnienia powinien ulec zmianie. Wyróżnić można w tej sprawie kilka propozycji – każda związana z innym czynnikiem występującym we wzorze ułatwiającym obliczenie wskaźnika *UGR*. W pierwszej grupie proponowana jest korekta wskaźnika położenia *p* [17, 21, 39] z uwzględnieniem różnych miar niejednorodności oprawy. Inne podejście opiera się na modyfikacji parametru definiującego wielkość oprawy ω [35, 37, 44]. Trzecie podejście to uwzględnienie niejednorodności oprawy w czynniku określającym luminancję źródła oślnienia [25, 29, 30, 40, 41] przez zastosowanie współczynnika korekcyjnego obliczanego różnymi metodami, zależnymi od geometrii oprawy i zastąpienie luminancji średniej wartością „skuteczną” (ang. *effective*), a niekiedy nawet uwzględniając luminancję tła [45]. Kolejne propozycje [46, 47] opierają się na klasyfikacji typu źródła i dla każdego typu określenie, dodanie we wzorze składnika, który jest tym większy im wyższy jest kontrast luminancji oprawy.

W przypadku źródła o równomiernej luminancji dodatkowy składnik wynosi zero i wzór przyjmuje podstawową formę.

Kolejne propozycje wynikające z badań subiektywnych to całkowite odejście od metody *UGR* i opracowanie nowych wskaźników [34, 48, 49, 50] bazujących na analizie mapy luminancji w badanym pomieszczeniu, co stanowi jedyne podobieństwo tych metod z metodą *UGR*. W literaturze można znaleźć także propozycję metody oceny oślnienia opraw z diodami elektroluminescencyjnymi odchodzącą od charakteryzowania oprawy przez luminancję. Autorzy [51] przedstawili wyniki badań, w których wykazali korelację wskaźnika oślnienia wg skali de Boera oraz logarytmiczną funkcją strumienia świetlnego źródła oślnienia.

2.2.4. WYMAGANIA DLA OŚWIETLENIA EWAKUACYJNEGO W BUDYNKACH

Podstawową funkcją oświetlenia elektrycznego jest umożliwienie przeniesienia wykonywanych czynności przy świetle dziennym na porę, kiedy ono nie występuje oraz umożliwienie pracy w pomieszczeniach, do których światło dzienne nie dociera. W chwili nagłego zaniku oświetlenia pojawia się u człowieka niepokój, a nawet panika. Sytuacje takie są niebezpieczne i mogą doprowadzić do zagrożenia zdrowia lub życia. Zaniki oświetlenia podstawowego mogą być spowodowane awarią zasilania, wyłączeniem u dostawcy lub dodatkowymi czynnikami, jak np. pożarem. W takich oraz podobnych sytuacjach okazuje się bardzo pomocne oświetlenie awaryjne, którego głównym celem jest oświetlenie stanowisk pracy, pomieszczeń oraz dróg ewakuacyjnych zgodnie z określonymi wymaganiami.

Ponieważ instalacje oświetlenia awaryjnego mają bezpośredni związek z bezpieczeństwem ludzi, w związku z tym parametry techniczne takich instalacji (oświetleniowe, elektryczne) oraz skuteczność działania określone są w kilku normach ze sobą powiązanych. Najważniejszą normą w Polsce, która dotyczy oświetlenia awaryjnego, jest PN-EN 1838:2013-11 *Zastosowanie oświetlenia – Oświetlenie awaryjne* [52]. Wymagania, które są zawarte w podanej normie określają wartości minimalne, jakie powinny spełniać systemy oświetlenia awaryjnego. Norma ta przeznaczona jest głównie do stosowania w budynkach użyteczności publicznej oraz miejscach pracy.

Ze względu na fakt, iż oświetlenie awaryjne stosuje się po zaniku zasilania opraw do oświetlenia podstawowego, zasilanie opraw oświetlenia awaryjnego musi odbywać się z innego źródła zasilania niż źródło zasilania opraw do oświetlenia podstawowego.

Oświetlenie awaryjne dzieli się na oświetlenie ewakuacyjne i oświetlenie zapasowe. W skład awaryjnego oświetlenia ewakuacyjnego, którego głównym celem jest zapewnienie bezpieczeństwa w trakcie opuszczania miejsca pobytu w momencie zaniku oświetlenia podstawowego, wchodzi:

- oświetlenie drogi ewakuacyjnej,
- oświetlenie strefy otwartej (zapobiegającego panice),
- oświetlenie strefy wysokiego ryzyka.

Celem oświetlenia drogi ewakuacyjnej jest zapewnienie bezpieczeństwa podczas opuszczania miejsc pobytu, stwarzając odpowiednie warunki, w których możliwa będzie identyfikacja oraz wykorzystanie dróg ewakuacyjnych, a także zlokalizowanie i zastosowanie sprzętu pożarowego i sprzętu bezpieczeństwa.

Wymagania oświetleniowe dotyczące oświetlenia dróg ewakuacyjnych są następujące:

- na drodze ewakuacyjnej o szerokości do 2 m średnie natężenie oświetlenia na podłożu wzdłuż środkowej linii tej drogi powinno wynosić min 1 lx, a w przypadku centralnego pasa drogi, obejmującego co najmniej połowę szerokości drogi, natężenie oświetlenia powinno wynosić min 0,5 lx,
- stosunek maksymalnego do minimalnego natężenia oświetlenia wzdłuż centralnej linii drogi ewakuacyjnej nie powinien wynosić więcej niż 40:1,
- w sytuacji, gdy na drodze ewakuacyjnej lub w strefie otwartej nie znajdują się punkty pierwszej pomocy oraz urządzenia przeciwpożarowe i przyciski alarmowe, należy je tak oświetlić, aby natężenie oświetlenia na podłodze w ich pobliżu wynosiło min 5 lx,
- olśnienie przeszkadzające należy utrzymywać na niskim poziomie przez ograniczenie światłości opraw w obrębie pola widzenia; maksymalna wartość światłości jest uzależniona od wysokości, na jakiej są zamieszczone oprawy nad poziomem podłogi (poszczególne zależności są przedstawione w [52]),
- minimalna wartość wskaźnika oddawania barw zastosowanych źródeł światła powinna wynosić min. 40,
- minimalny czas stosowania oświetlenia ewakuacyjnego w celach ewakuacji powinien wynosić 1 godz., przy czym 50% wymaganego natężenia oświetlenia powinno być wytworzone w czasie 5 s, a pełny poziom natężenia oświetlenia w czasie 60 s.

Oświetlenie strefy otwartej ma na celu zmniejszenie prawdopodobieństwa wystąpienia paniki i zapewnienie bezpiecznego ruchu osób kierujących się do dróg ewakuacyjnych, zapewniając warunki widzenia umożliwiające dojście do miejsca, z którego będzie widoczna droga ewakuacyjna.

Wymagania oświetleniowe dla oświetlenia strefy otwartej:

- natężenie oświetlenia w obrębie pustego pola strefy otwartej, wyznaczonego przez wyłączenie z tej strefy obwodowego pasa szerokości 0,5 m, powinno wynosić min. 0,5 lx na poziomie podłogi,
- stosunek maksymalnego do minimalnego natężenia oświetlenia w strefie otwartej nie powinien być większy niż 40:1,
- utrzymywanie olśnienia przeszkadzającego na niskim poziomie przez ograniczenie wartości światłości opraw w polu widzenia,
- minimalna wartość wskaźnika oddawania barw dla źródeł światła powinna wynosić 40,

- minimalny czas stosowania oświetlenia w celach ewakuacji powinien wynosić 1 godz., przy czym 50% wymaganego natężenia oświetlenia powinno być wytworzone w czasie 5 s, a pełny poziom natężenia oświetlenia w czasie 60 s.

Oświetlenie strefy wysokiego ryzyka ma za zadanie zwiększyć bezpieczeństwo ludzi uczestniczących w potencjalnie niebezpiecznym procesie lub sytuacji i umożliwić im właściwe zakończenie procedur ze względu na bezpieczeństwo innych osób przebywających w danym obiekcie.

Wymagania oświetleniowe dla oświetlenia strefy wysokiego ryzyka:

- natężenie oświetlenia awaryjnego na płaszczyźnie odniesienia nie powinno być mniejsze niż 10% eksploatacyjnego natężenia oświetlenia podstawowego wymaganego dla danych czynności, jednak nie powinno być mniejsze niż 15 lx,
- równomierność natężenia oświetlenia w strefie wysokiego ryzyka nie powinna wynosić mniej niż 0,1,
- oprawy nie mogą powodować efektu stroboskopowego,
- olśnienie przeszkadzające powinno być utrzymywane na niskim poziomie,
- dla rozpoznania barw minimalna wartość wskaźnika oddawania barw dla źródeł światła powinna wynosić 40.

Częścią oświetlenia awaryjnego, oprócz awaryjnego oświetlenia ewakuacyjnego, jest oświetlenie zapasowe, które umożliwi kontynuację wykonywanych czynności w zasadniczo niezmienny sposób.

Zastosowanie tego oświetlenia jako awaryjne oświetlenie ewakuacyjne powinno spełnić odpowiednie wymagania dotyczące oświetlenia ewakuacyjnego. Natomiast w sytuacji, gdy poziom oświetlenia zapasowego jest niższy od minimalnego poziomu natężenia oświetlenia podstawowego, należy wykorzystać to tylko do przerwania czynności lub ich zakończenia.

Znaki bezpieczeństwa przekazują ogólną informację dotyczącą bezpieczeństwa otrzymaną przez kombinację barwy i kształtu znaku oraz szczegółową informację dotyczącą bezpieczeństwa przez dodanie symbolu graficznego lub tekstu. Rozróżnia się dwa rodzaje znaków:

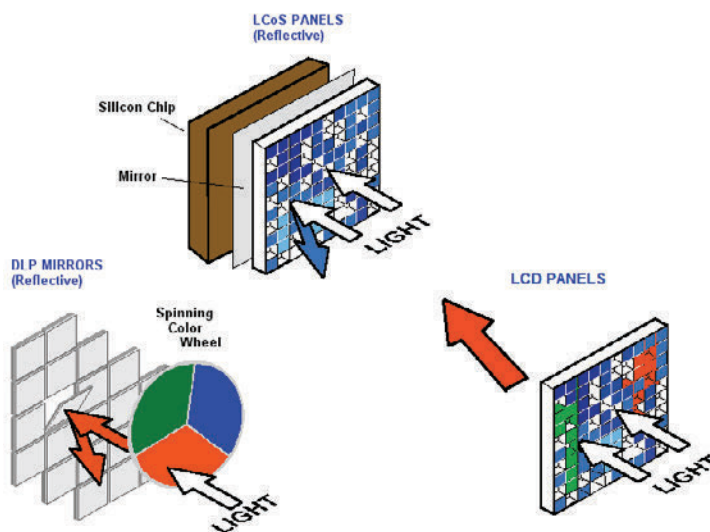
- znaki oświetlone zewnątrz – przez zewnętrzne źródło światła,
- znaki oświetlone wewnątrz – przez wewnętrzne źródło światła.

Wymagania oświetleniowe dla znaków bezpieczeństwa są następujące:

- luminancja każdej części barwnej znaku powinna wynosić min. 2 cd/m² we wszystkich kierunkach widzenia mających znaczenie dla bezpieczeństwa,
- stosunek maksymalnej do minimalnej luminancji białych oraz barwnych części znaków bezpieczeństwa powinien nie przekraczać 10:1,
- stosunek luminancji części białej znaku do luminancji części barwnej znaku powinien wynosić min. 15:1, ale nie więcej niż 15:1
- oświetlenie znaków powinno być tak dobrane, aby w ciągu 5 s osiągały one 50% wymaganej luminancji, a w ciągu 60 s osiągały luminancję o wartości wymaganej.

Oprawy oświetlenia awaryjnego i ewakuacyjnego dostępne handlowo wykorzystują w swojej budowie fluorescencyjne źródła światła oraz diody LED. Wybór tego typu rozwiązań spowodowany jest ich dużą skutecznością świetlną oraz możliwością wyboru względnie małych mocy źródeł i ich układów zasilania. Oprawy awaryjne zasilane są w sposób autonomiczny lub centralnie. Najpowszechniejszym sposobem zasilania jest zasilanie autonomiczne, wykorzystujące dedykowany zasobnik energii, najczęściej w postaci akumulatora. Typowa praca opraw awaryjnych i ewakuacyjnych może odbywać się w zakresie temperatur 5–40 °C, przy czym spotykane są rozwiązania specjalne do pracy w zakresach temperatury –25 do +50 °C [6].

Pożądaną cechą systemu oświetlenia awaryjnego jest możliwość prezentacji treści w postaci piktogramów i znaków bezpieczeństwa. Treść piktogramów powinna być jednoznaczna, uniwersalna, ale również powinna umożliwiać modyfikację treści znaku, w zależności od zdarzeń powstałych w wyniku awarii. Realizacja zmiany treści oznakowania powinna być ściśle związana z systemem zarządzania budynkiem (BMS), w którym istotną rolę pełni instalacja oświetlenia awaryjnego połączona z nadrzędnym systemem zarządzania kryzysowego.



Rys. 8. Sposoby uzyskiwania obrazu w technologiach LCD, LCoS i DLP [53]
 Fig. 8. Methods of obtaining image in LCD, LCoS and DLP technology [53]

Analizując potrzeby systemu oświetlenia ewakuacyjnego pod względem możliwości modyfikacji treści znaków bezpieczeństwa, zaproponowano wykorzystanie nowoczesnych źródeł światła w postaci emiterów półprzewodnikowych LED/OLED, laserowych oraz rozwiązań służących do dynamicznej modyfikacji prezentowanych treści w postaci modułów LCD oraz DLP lub LCoS. W technologii LCD wykorzystuje się

ciekle kryształy, które współpracują dodatkowo z systemami podświetlającymi wykorzystującymi diody LED. Od sposobu realizacji podświetlenia zależeć będzie równomierność rozkładu luminancji oraz tzw. „jasność” wyświetlacza. Technika obrazowania wykorzystująca moduły DLP (ang. *Digital Light Processing*) i elementy wykonawcze DMD (ang. *Digital Micromirror Device*) lub LCoS (ang. *Liquid Crystal on Silicon*) (rys. 8) również może być użyta do budowy opraw oświetlenia awaryjnego, ale emisja promieniowania jest wynikiem odbicia strumienia świetlnego od pojedynczych komórek (mikrolustra w modułach DMD lub komórki LCD na podkładzie lustrzanym).

Moduły i wyświetlacze LCD oraz OLED zwykle opisuje się technicznie za pomocą dwóch parametrów: luminancji średniej i kontrastu dynamicznego. Podobne parametry odnoszą się do opisu opraw ewakuacyjnych, możliwe zatem jest wykorzystanie tego typu emitera do pracy jako sprzęt oświetleniowy. W typowych urządzeniach, mających wyświetlacze LCD, średnia wartość luminancji przyjmuje wartości od około 100 cd/m^2 do ok. 300 cd/m^2 . Kontrast ANSI (biały do czarnego) osiąga wartości 1:1000 i więcej (typowo 1:800). Zakładając, że minimalna wartość luminancji ekranu ze znakiem bezpieczeństwa wynosić będzie 200 cd/m^2 , wówczas zielone tło powinno charakteryzować się luminancją w przedziale $13,33\text{--}40 \text{ cd/m}^2$.

Biorąc pod uwagę typowe rozmiary emiterów dostępnych handlowo, możliwe jest przeanalizowanie ich położenia w strefie realizującej oświetlenie ewakuacyjne, mając na względzie odległość obserwacji znaku bezpieczeństwa:

$$L = h * p \quad (13)$$

gdzie:

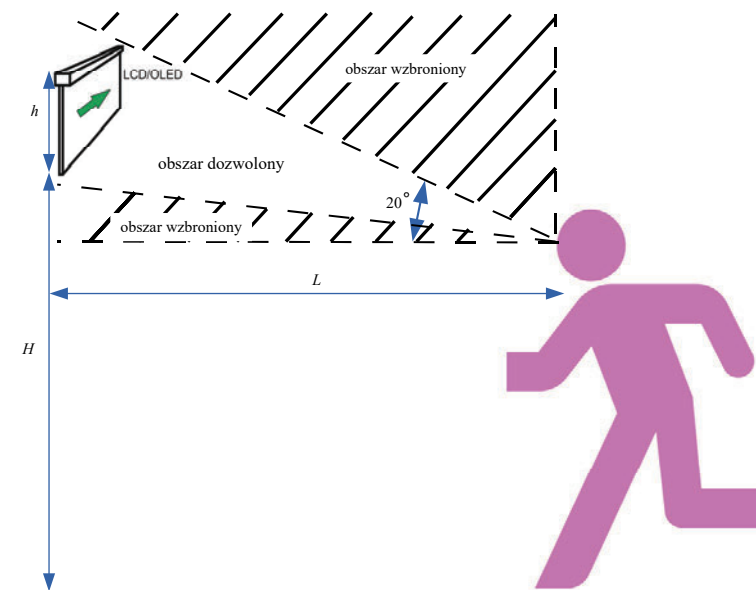
L – odległość obserwacji znaku bezpieczeństwa,

h – wysokość znaku,

p – wartość stała określająca rodzaj oświetlenia znaku: $p = 100$ dla znaków oświetlanych zewnątrz, $p = 200$ dla znaków oświetlanych wewnątrz.

Ze względu na to, że moduły LCD i OLED emitują strumień świetlny, należy użyć stałej $p = 200$, określającej znaki oświetlane wewnątrz. Moduły DLP i LCoS odbijają strumień świetlny i kierują go na ekran rozpraszający, należy zatem użyć stałej $p = 100$.

W sytuacji, gdy wymagania normy PN-EN 50172:2005 [54] nakazują montaż opraw ewakuacyjnych i znaków bezpieczeństwa na wysokości minimum 2 m, a ich widoczność determinuje obserwację w obszarze kąta widzenia do 20° , licząc od poziomu wzroku, odległość pomiędzy oprawami ewakuacyjnymi jest ściśle określona. Minimalna wysokość montażu oprawy oraz obserwacja w zadanym kącie powodują, że pole widzenia można podzielić na obszar wzbroniony i obszar dozwolony, w którym możliwe jest ulokowanie sprzętu oświetleniowego realizującego prezentację znaku bezpieczeństwa (rys. 9).



Rys. 9. Geometria położenia oprawy ewakuacyjnej
Fig. 9. Emergency luminaire geometry layout

Średnia wysokość linii wzroku człowieka stojącego, według PN-EN 547-3:2000 [55], zmienia się w zakresie 1,402–1,745 m, przyjmuje się zatem do obliczeń uśrednioną wartość położenia wzroku na wysokości 1,574 m od powierzchni podłogi. Na podstawie obliczonych parametrów związanych z odległością obserwacji znaków bezpieczeństwa wynika, że wysokość montażu H oprawy ewakuacyjnej (rys. 9) nie powinna przekraczać 8 m, gdy emiter LCD charakteryzuje się przekątną 7" i 30 m, gdy emiter ma przekątną 32" (w sytuacji gdy znak jest oświetlony wewnątrz) i odpowiednio nie powinna przekraczać 5,5 m, gdy emiter LCD charakteryzuje się przekątną 7" i 19 m, gdy emiter ma przekątną 32".

3. PRZYKŁADY NOWYCH ROZWIĄZAŃ OPRAW OŚWIETLENIOWYCH ZE ŹRÓDŁAMI PÓLPRZEWODNIKOWYMI

3.1. MODEL OPRAWY OŚWIETLENIA OGÓLNEGO O REGULOWANEJ TEMPERATURZE BARWOWEJ I WYSOKICH WSKAŹNIKACH ODDAWANIA BARW

Wobec dążenia do oświetlania efektywnego energetycznie i jak najbardziej zbliżonego pod względem spektralnym do światła naturalnego oczywiste jest dążenie, by oświetlenie elektryczne umożliwiała adaptację temperatury barwowej oraz ilości stru-

mienia świetlnego, w zależności od warunków panujących w pomieszczeniu. Norma PN-EN 12464-1:2012 narzuca – zależnie od obszaru aplikacyjnego – minimalne dopuszczalne wartości graniczne wskaźnika oddawania barwy, wskazując jednocześnie, że wykorzystanie światła naturalnego powinno być istotnym źródłem strumienia świetlnego mającego zapewnić wymagane wartości natężenia oświetlenia na powierzchniach roboczych oraz właściwe parametry kolorymetryczne światła. Ze względu na zmienność charakterystyki spektralnej promieniowania słonecznego zachodzi potrzeba regulacji temperatury barwowej opraw stosowanych we wnętrzach. Stosując konwencjonalne źródła światła, jest to co najmniej utrudnione. Wykorzystując dostępne komercyjnie źródła LED możliwe jest dobranie takich zestawów oraz układów ich zasilania i sterowania, aby zapewnić dopasowywanie temperatury barwowej światła tak, by promieniowanie emitowane z oprawy miało charakterystykę widmową zbliżoną do warunków oświetleniowych wywołanych światłem naturalnym. Zastosowanie takiego rozwiązania umożliwi również zmianę temperatury barwowej oprawy w zależności od wymagań konkretnego stanowiska pracy, a także adaptację całkowitego strumienia oprawy, zależnie od stanu oświetlenia światłem naturalnym w pomieszczeniu.

Dobierając zestaw diod elektroluminescencyjnych o odpowiednich parametrach, w szczególności rozkładzie spektralnym, można modelować wypadkową charakterystykę spektralną zestawu źródeł, regulować jego wypadkową temperaturę barwową najbliższą i wpływać na wartość wskaźnika oddawania barw.

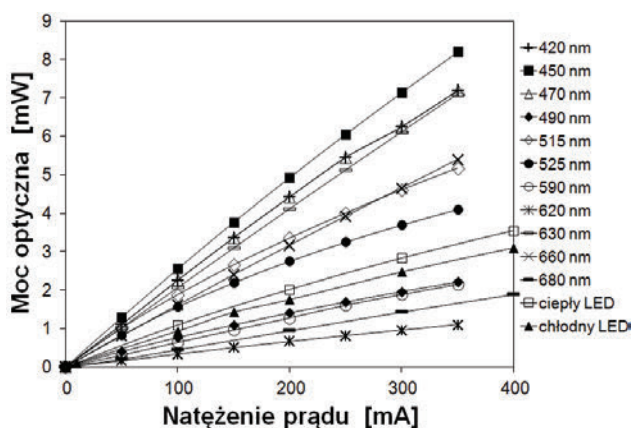
W celu dokonania selekcji źródeł białych i monochromatycznych do użycia w modelu oprawy, przeprowadzono wiele symulacji polegających na modelowaniu wypadkowego rozkładu spektralnego zestawów diod. W analizach przyjęto teoretyczne rozkłady spektralne oraz zakładano liniowe zmiany mocy optycznej w funkcji zmian prądu. Następnie przeprowadzone zostały badania wstępnie wybranej grupy źródeł, przy czym – opierając się na literaturze, w której przedstawiane są wyniki symulacji i pomiarów zmiany temperatury barwowej najbliższej, przyjęto założenie, że w docelowym zestawie powinny się znaleźć zarówno diody białe o różnych wartościach temperatury barwowej najbliższej, jak również diody barwne. W tym miejscu na uwagę zasługuje fakt, że publikacje naukowe, których autorzy przedstawili wyniki swoich prac nad oprawami wykorzystującymi źródła LED traktowali dosyć powierzchownie lub w ogóle nie analizowali kwestii jakości oddawania barw. Natomiast w przypadku, gdy przedmiotem badań była jakość oddawania barw, prace nie miały przełożenia na efekt praktyczny – były ukierunkowane na naukowe analizy metodyki oceny wskaźnika oddawania barw, który we właściwy sposób opisywałby tę cechę światła emitowanego przez diody elektroluminescencyjne.

3.1.1. WPLYW SPOSOBU ZASILANIA DIODY ELEKTROLUMINESCENCYJNEJ NA EMISJĘ STRUMIENIA ŚWIETLNEGO

Przed przeprowadzeniem badań przeprowadzona została analiza możliwości sposobu zasilania diod. Układy zasilające diody elektroluminescencyjne można zakwali-

fikować do dwóch podstawowych kategorii: układy zasilania stałoprądowego (DC) oraz układy zasilania impulsowego kojarzone często z modulacją szerokości impulsu (PWM). Promieniowanie optyczne wytwarzane przez LED-y zasilane stałoprądowo oraz impulsowo wykazuje sporo istotnych różnic. W układach stałoprądowych otrzymuje się światło stabilne czasowo, pozbawione zakłóceń. Układy zasilania stałoprądowego i sterowania charakteryzują się większą złożonością oraz mniejszą sprawnością energetyczną i wyższymi kosztami. Tanie, łatwo przestrajalne układy impulsowe wytwarzają promieniowanie „zaśmieczone” wyższymi harmonicznymi, które są bardzo trudno mierzalne oraz których skutki długotrwałego oddziaływania na organizm ludzki nie są jeszcze poznane [56].

Zasilanie stałoprądowe jest historycznie najstarszą metodą sterowania diod elektroluminescencyjnych. Z nachylenia charakterystyki prądowo-napięciowej diody wynika, iż większą stabilność punktu pracy uzyskuje się, kontrolując natężenie prądu niż spadek napięcia na diodzie. Charakterystyka konwersji prąd/moc promieniowania optycznego LED (rys.10) jest w przypadku zasilania stałoprądowego funkcją prawie liniową.



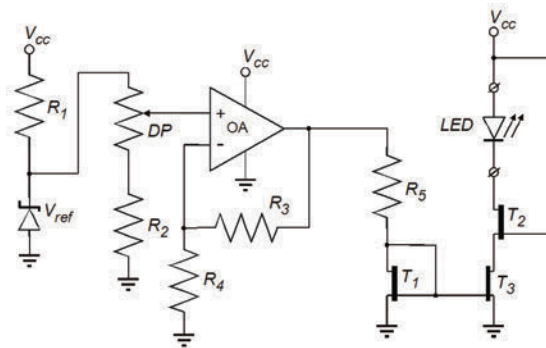
Rys. 10. Wybrane charakterystyki przedstawiające zależność mocy optycznej w funkcji prądu zasilania przebadanych LED-ów monochromatycznych i białych [56]

Fig. 10. Selected characteristics of radiant power versus current for investigated monochromatic and white LEDs [56]

W najprostszym układzie polaryzacji stałoprądowej stosuje się pasywny układ zawierający szeregowo włączony rezystor. Im wartość rezystancji szeregowej jest wyższa, tym bardziej stabilny jest punkt pracy oraz mniejsza sprawność energetyczna całego układu. Wraz z rozwojem technologii elementów półprzewodnikowych powstały opracowania aktywnych źródeł prądowych o dużej rezystancji wewnętrznej, które ze względu na swój charakter zapewniają większą sprawność energetyczną [57].

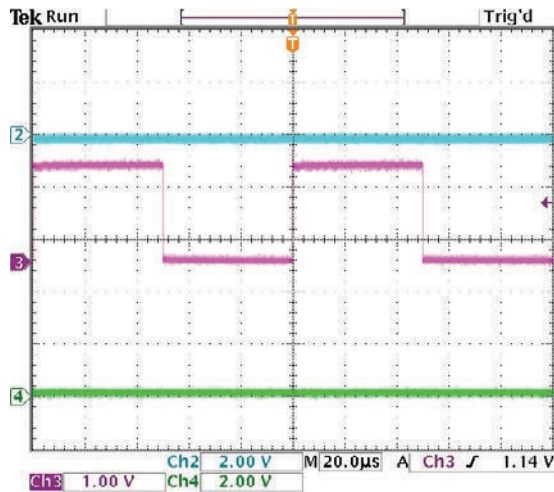
Przykładową aplikację przestrajanego źródła prądowego w układzie czwórnikowym przedstawiono na rysunku 11. Wysoko stabilne napięcie odniesienia V_{ref} jest

dzielone w układzie potencjometru DP. Wydzielona część tego napięcia jest następnie wzmacniana przez wzmacniacz napięciowy OA w konfiguracji nieodwracającej. Wzmacniacz ten, oprócz dopasowania napięciowego, zapewnia wymaganą przez następny stopień obciążalność prądową. Sygnał wyjściowy wzmacniacza OA polaryzuje obwód wyjściowy stopnia końcowego. Stopień ten stanowią rezystor R_5 oraz tranzystory T_1 , T_2 oraz T_3 . Parametry tranzystorów T_1 i T_2 są dobrane w taki sposób, aby można było uzyskać 100-krotne wzmocnienie prądowe całego stopnia. Dzięki temu prądem rezystora R_5 o stosunkowo małym natężeniu można kontrolować znacznie większy prąd wyjściowy płynący przez LED, włączony między wyjście układu a napięcie zasilające cały układ [57].



Rys. 11. Układ aplikacyjny przestrajalnego źródła prądowego [57]

Fig. 11. Application circuit of tunable current source [57]

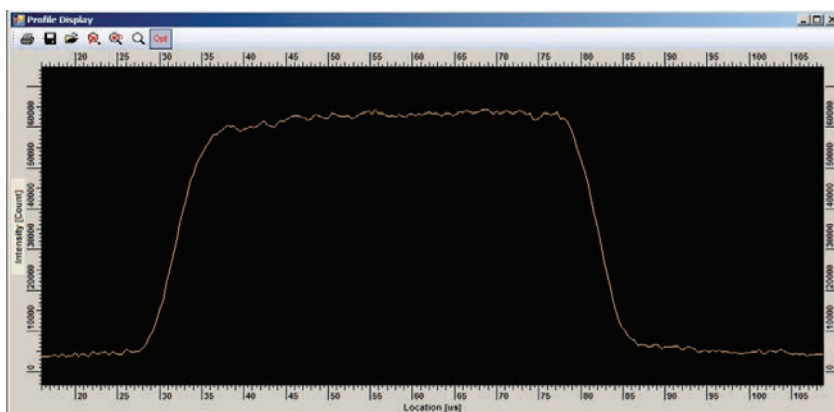


Rys. 12. Przykładowa charakterystyka czasowa zasilania impulsowego [57]

Fig. 12. Example of time characteristic of PWM supply [57]

Alternatywną techniką zasilania LED, w stosunku do zasilania stałoprądowego, jest zasilanie impulsowe. Układy aplikacyjne zasilania impulsowego zawierają zazwyczaj sterowane źródła prądowe [58] w konfiguracji dwójnikowej lub czwórnikowej. W stosunku do zasilania DC przepływ prądu następuje nie w sposób ciągły, lecz okresowy (krzywa 3, rys. 12) z zadaniem współczynnikiem wypełnienia impulsu. Częstotliwość powtarzania jest wyższa od zmian obrazów postrzeganych jako migotanie, czyli powyżej 100 Hz. Praktyczne wartości częstotliwości powtarzania wynoszą około 10 kHz i wynikają głównie z uwarunkowań technicznych układów zasilających.

W związku z tym, że analiza impulsowych układów zasilających nie jest głównym zagadnieniem, w dalszej części rozdziału skoncentrowano się jedynie na przedstawieniu wyników pomiaru i ich wpływu na charakterystyki emisyjne źródła.



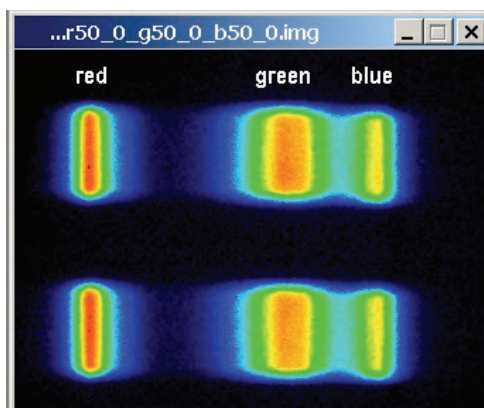
Rys. 13. Odpowiedź czasowa strumienia świetlnego na pobudzenie z rysunku 12 [56]
Fig. 13. Time response of luminous flux for impulses as presented in figure 12 [56]

Jedną z podstawowych charakterystyk jest odpowiedź czasowa strumienia świetlnego na pobudzenie impulsowe prądu zasilającego. W czasowych warunkach sterowania z poprzedniego rysunku (współczynnik wypełnienia impulsu 50%, częstotliwość powtarzania 10 kHz) otrzymano przebieg odpowiedzi czerwonej LED, którą przedstawiono na rysunku 13. Kolor tła i opis osi rysunku wynikają z firmowych ustawień przyrządu pomiarowego (kamery smugowej Hamamatsu [59]). Porównując przebiegi z obu rysunków, wyraźnie widać, iż kształt odpowiedzi odbiega od sygnału wymuszającego. W szczególności: inne są czasy narastania oraz nachylenia zboczy impulsów, inne jest nachylenie w stanie ustalonym, oscylacyjny przebieg w stanie ustalonym można tłumaczyć występowaniem szumu w stanie ustalonym prądu zasilającego. Nie można zatem zakładać, że kształt impulsowego sygnału świetlnego LED w pełni odwzorowuje kształt prądu zasilającego.

Podczas przeprowadzonych badań nie zauważono zmian charakterystyki spektralnej badanej LED w przypadku zasilania stałoprądowego i impulsowego. Przedmiotem

badan była dioda emitująca promieniowanie z czerwonego zakresu widma, w której maksymalny strumień przypadał dla długości fali 644 nm.

Z zupełnie inną sytuacją mamy do czynienia w przypadku impulsowego zasilania zestawu źródeł LED, złożonego z elementów różniących się charakterystykami widmowymi. Bardzo prostym, ale obrazującym wszystkie cechy, przykładem takiej struktury może być trójemiterowa LED RGB. W przypadku oświetlacza wieloemiterowego dostępne są dwa dodatkowe parametry regulacyjne: współczynniki wypełnienia prądów zasilających poszczególne diody oraz możliwość realizacji wzajemnych opóźnień czasowych tych prądów. Zmiana współczynnika wypełnienia impulsu realizuje podobny efekt, wrażenia regulacji amplitudy strumienia świetlnego, jak zmiana wartości zasilającego prądu stałego. Z tego powodu sygnały świetlne o dostatecznie wysokiej częstotliwości powtarzania, o mniejszym współczynniku wypełnienia postrzegane są przy niższym natężeniu, podczas gdy sygnały o wyższym współczynniku wypełnienia przy natężeniu wyższym. Górną granicą jest 100%, wartość współczynnika wypełnienia, odpowiadająca zasilaniu stałoprądowemu.



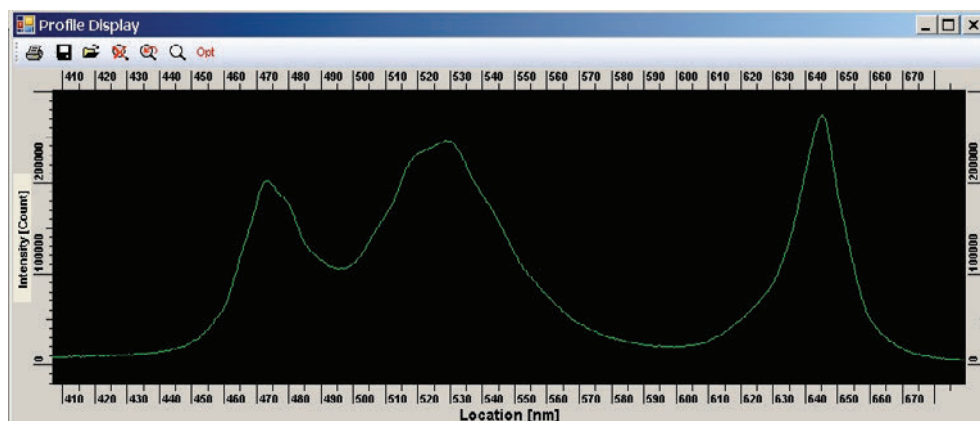
Rys. 14. Odwzorowanie widmowo-czasowe mierzonego sygnału LED RGB [56]

Fig. 14. Spectral-temporal projection of the measured LED RGB signal [56]

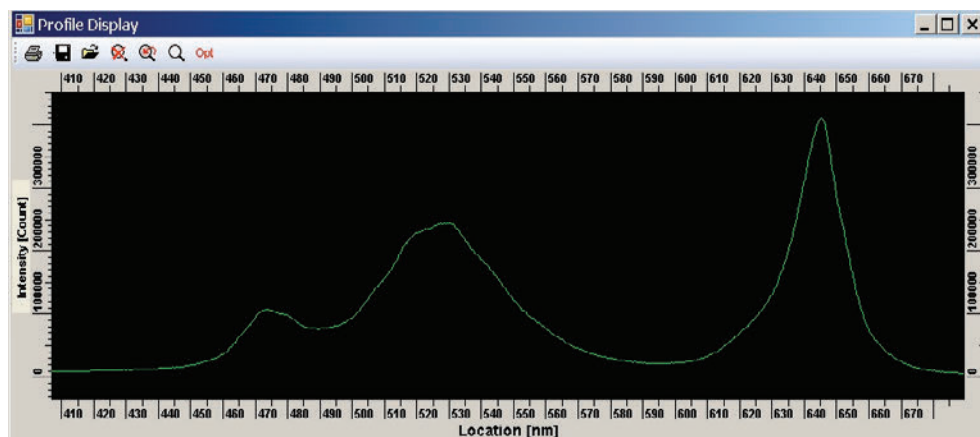
Jeżeli poszczególne diody struktury RGB są sterowane sygnałami impulsowymi o różnych współczynnikach wypełnienia, możliwe jest modelowanie wypadkowej widmowej charakterystyki emisyjnej, którego wyniki przedstawiono na rysunkach 14 i 15. Rysunek 14 zawiera odwzorowanie zmierzonego sygnału w postaci obrazu wytworzonego w systemie kamery smugowej. Oś pozioma obrazu odpowiada odwrotnej skali długości fali promieniowania. Najbardziej na lewo widoczne jest stosunkowo wąskie pasmo promieniowania składowej *R*, barwne poziomice (niewidoczne na obrazie czarno-białym) odwzorowują poziomy mocy promieniowania, wewnętrzny (czerwony obszar) wskazuje długości fali o największej gęstości mocy. Szerokie, w środku obrazu, pasmo promieniowania dotyczy charakterystyki widmowej składowej *G*. Naj-

bardziej na prawo położone jest widmo składowej B o najmniejszej amplitudzie. Oś pionowa odpowiada skali czasu impulsów promieniowania. W omawianym przypadku wszystkie składowe monochromatyczne były wyzwalane impulsami prądowymi o 50% współczynnika wypełnienia i zerowych opóźnieniach czasowych względem siebie.

Na podstawie analizy otrzymanego obrazu widmowo-czasowej charakterystyki wyznaczona została wypadkowa charakterystyka widmowa przedstawiona na rysunku 15. Widoczne jest, że jest ona superpozycją trzech składowych monochromatycznych (R , G i B). Dokonując w sposób cyfrowy zmiany współczynników wypełnienia prądów zasilających poszczególne składowe, można modelować wypadkową charakterystykę widmową.

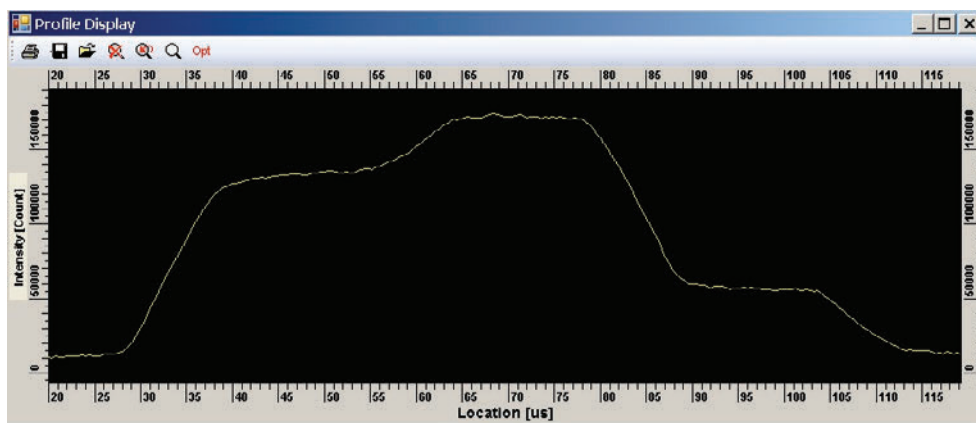


Rys. 15. Wypadkowa widmowa charakterystyka emisyjna badanej LED RGB
Fig. 15. Resultant spectral emission characteristics of the tested RGB LED



Rys. 16. Wypadkowa charakterystyka dla innych współczynników wypełnienia prądów diody
Fig. 16. Resultant characteristics for another fill factor of the diodes currents

Przykładem jest zmierzona krzywa przedstawiona na rysunku 16. Dotyczy ona tej samej LED RGB, jednak w tym przypadku zmieniono współczynniki wypełnienia: składowej R z 50% na 75%, składowej B z 50% na 25%, składową G pozostawiono na tym samym co poprzednio 50% poziomie. W efekcie w obszarze dominowania składowej zielonej kształt charakterystyki nie zmienił się, w zakresie składowej niebieskiej charakterystyka zmniejszyła się, natomiast w obszarze składowej czerwonej zwiększyła się.



Rys. 17. Wypadkowa charakterystyka badanej LED RGB
Fig. 17. Resultant characteristics of tested RGB LED

Podobny efekt modelowania charakterystyki wypadkowej w dziedzinie czasu, można uzyskać, zmieniając przesunięcia fazowe prądów zasilających elementy składowe. Przykładem może być czasowa charakterystyka wypadkowa (odpowiedź czasowa) przedstawiona na rysunku 17. 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 współczynnikiem wypełnienia, składową B zaś zasilano prądem o 25% wypełnieniu i 90-stopniowym przesunięciu fazowym. Jednoczesna zmiana współczynników wypełnienia i opóźnienia fazowego ułatwia modelowanie odpowiedzi czasowej zarówno w kierunku osi X (czasu), jak i Y (amplitudy).

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

3.1.2. PROJEKTOWANIE CHARAKTERYSTYKI SPEKTRALNEJ Z KRYTERIUM JAKOŚCI ODDAWANIA BARW

W celu dokonania weryfikacji wcześniej przeprowadzonych symulacji, opartych na teoretycznych rozkładach spektralnych, przeprowadziliśmy badania laboratoryjne,

których celem było określenie rzeczywistych charakterystyk spektralnych diod i ich zmian w funkcji zmian warunków ich pracy.

Pomiary przeprowadzono w ciemni optycznej w temperaturze otoczenia wynoszącej 25 °C. Diody kolejno były zasilane stałym prądem o zakładanym natężeniu z zakresu określonego w karcie katalogowej każdej diody. Do tego celu użyto zasilacza stabilizowanego. Następnie za pomocą radiometru OL-750 rejestrowano ich charakterystyki spektralne (rys. 18). Na tej podstawie opracowano bazę danych zestawu umożliwiającą przeprowadzenie symulacji wybranych wzorcowych rozkładów spektralnych.

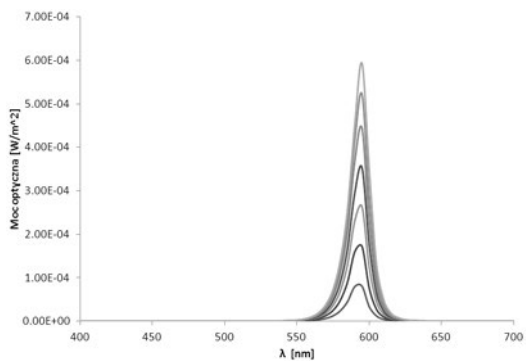
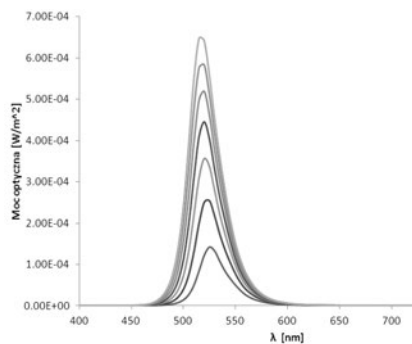
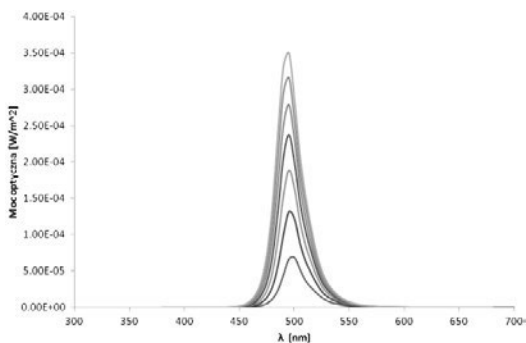
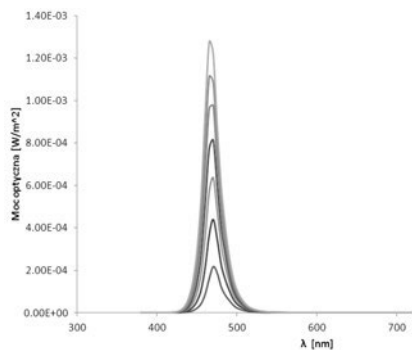
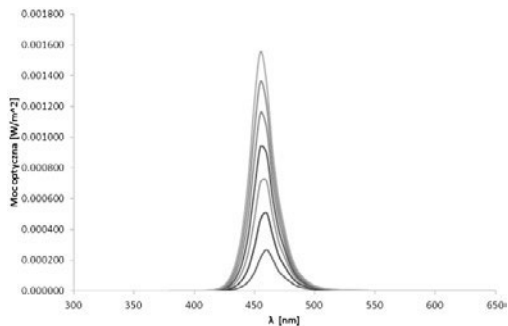
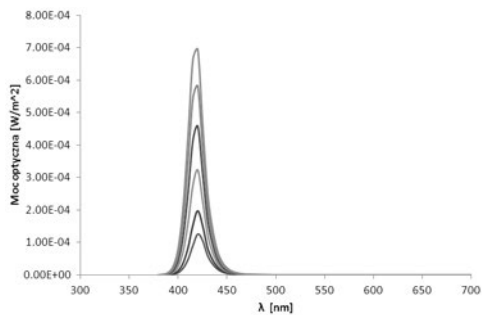
Na etapie projektowania układu zasilającego ważną informacją jest wpływ wartości natężenia prądu zasilającego na przesunięcie długości fali odpowiadającej maksymalnej emisji. Zmiany długości fali maksymalnej emisji wraz ze zmianą natężenia stałego prądu zasilającego są niewielkie.

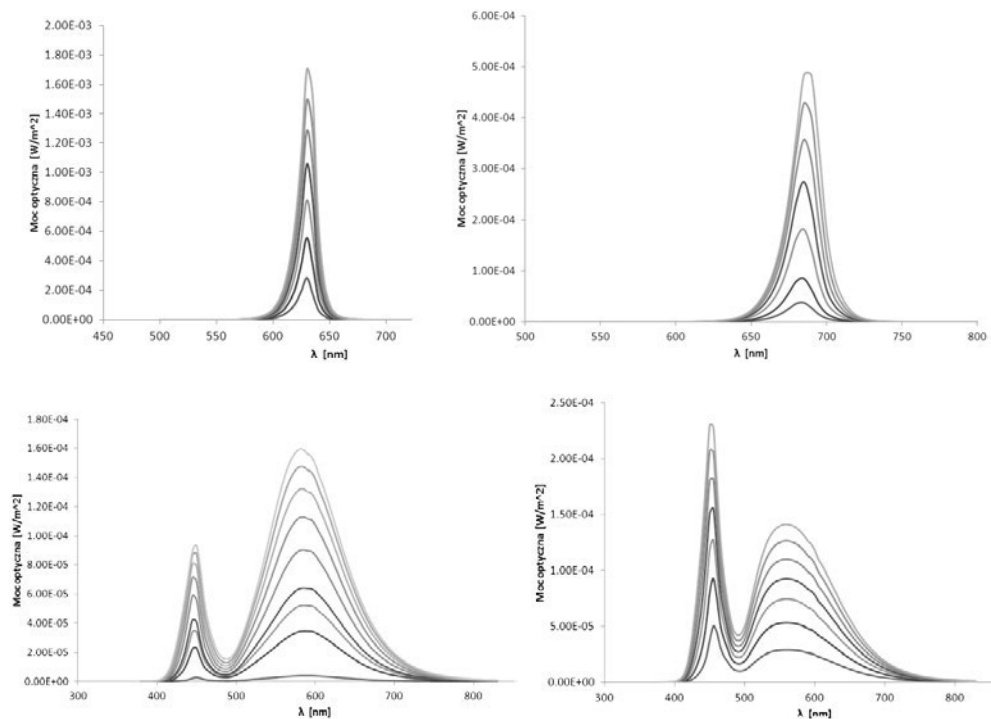
Równie ważną informacją, jak stabilność położenia charakterystyki emisyjnej, w trakcie projektowania oświetlacza LED-owego jest zależność widmowych pasm emisyjnych diod (w tym parametru *FWHM*) składowych od natężeń prądów zasilających. Z otrzymanych wyników pomiarów, przedstawionych na rysunku 18, wynika, 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 – krzywa zależności *FWHM* od natężenia prądu jest inna dla każdej diody. Oznacza to, iż tendencji nie można uogólnić i wrażliwość zmiany tego parametru należy dla każdej diody rozpatrywać oddzielnie. Podana właściwość powoduje określone konsekwencje projektowe – każdą z diod składowych oświetlacza LED-owego należy scharakteryzować indywidualnie i rozważyć wpływ niestabilności *FWHM* na przebieg wypadkowej charakterystyki widmowej lampy. Podobny problem występuje podczas eksploatacji oświetlacza, gdy uszkodzoną diodę należy zastąpić przemierzonym elementem o zbliżonych do źródłowej charakterystyki.

Dla analizowanego zestawu diod, 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 (poza diodą 660 nm). W przeważającej większości wypadków zmiana współrzędnych kolorymetrycznych była zauważalna na drugim miejscu po przecinku.

W celu sprawdzenia możliwości konstrukcji oprawy umożliwiającej adaptację jej spektrum do rozkładu spektralnego promieniowania słonecznego oraz charakteryzującej się wysokimi współczynnikami oddawania barw – ogólnym R_a i szczegółowymi R_1 – R_{14} , przeprowadzono symulacje przykładowych możliwych charakterystyk spektralnych [60]. Z badanego zestawu diod wybrano 6 źródeł, których dane posłużyły do przeprowadzenia symulacji rozkładów spektralnych o zakładanych, różnych temperaturach barwowych (tab. 1). Dla każdego zestawu określano ogólny wskaźnik oddawa-

nia barw R_a oraz wskaźniki szczegółowe R_1 – R_{14} . Wyniki obliczeń wskazują, że na bazie zestawu diod elektroluminescencyjnych możliwe jest skonstruowanie oprawy o regulowanej temperaturze barwowej najbliższej i wysokim wskaźniku oddawania barw – zarówno ogólnym, jak i szczegółowym.





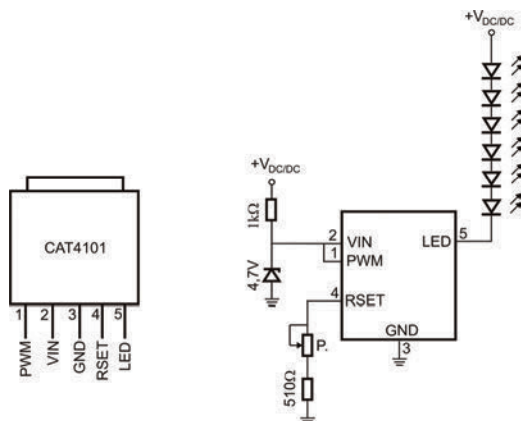
Rys. 18. Wybrane charakterystyki spektralne badanych diod elektroluminescencyjnych
 Fig. 18. Exemplary spectral characteristics of tested LEDs

Tabela 1. Zestawienie przykładowych wartości temperatury barwowej najbliższej dla oświetlenia półprzewodnikowego [60]
 Table 1. The summary of exemplary values of correlated colour temperature for solid state lighting [60]

Wartość zakładana [K]	2700	3000	3500	4000	4500	5000	5700	6500
Wartość obliczona [K]	2725	3045	3465	3985	4503	5029	5667	6532
i tolerancja ΔT [K]	± 145	± 175	± 245	± 275	± 243	± 283	± 355	± 510

Ze względu na wykorzystanie 6 typów diod i konieczność regulacji prądu płynącego przez każde ramię (w sensie elektrycznym) do budowy układu zasilania lampy wykorzystano zestaw 6 źródeł prądowych – każde dedykowane do osobnej gałęzi elektrycznej układu. Do budowy źródeł prądowych wybrano popularny układ CAT4101 w konfiguracji przedstawionej na rysunku 19. Wartość prądu LED ustala się jednym rezystorem zewnętrznym i może ona sięgać 1 A, co przewyższa wymagania zasilania lampy (patrz tab. 1).

Napięcie zasilające gałąź LED nie powinno przekraczać 25 V. Analizując wyniki przeprowadzonej w poprzednim etapie charakteryzacji komponentów, można stwierdzić, że w przypadku wybranych diod warunek ten jest spełniony dla 6 emiterów w gałęzi.



Rys. 19. Po lewej – schemat wyprowadzeń układu 4101, po prawej – układ aplikacyjny źródła prądowego do zasilania gałęzi LEDów [57]

Fig. 19. On the left – scheme of the pins of 4101 circuit, on the right – application circuit of the current source for LEDs supply [57]

W przedstawionym układzie wartość prądu zasilającego gałąź LED I_{LED} jest ustalana przez wartość rezystancji szeregowego połączenia potencjometru P i rezystancji ograniczającej 510 omów i jest 400 razy większa od wartości prądu odniesienia I_{ref} płynącego przez potencjometr P i rezystancję 510 omów.

Jeżeli w układzie nie jest stosowana modulacja PWM, wyprowadzenie nr 1 łączy się z pinem nr 2. W opisywanym układzie do zasilania CAT4101 wykorzystano spadek napięcia na diodzie Zenera 4,7 V, zasilanej przez rezystor 1 kΩ z napięcia wyjściowego przetwornicy.

Do zasilania opisanego układu wymagane jest napięcie referencyjne – do tego celu wykorzystano regulowaną przetwornicę ułatwiającą uzyskanie napięcia wyjściowego z zakresu 4–25 V, wybierane za pomocą potencjometru. Wymagane napięcie wejściowe mieści się w zakresie 1,5–16 V. Przy napięciu wyjściowym 24 V i wymaganych wartościach prądów sprawność przetwornicy jest w granicach 80–90% i zależy ona od napięcia wejściowego oraz wybranego napięcia wyjściowego.

Ewentualna nadwyżka mocy w układzie wydzielona na sterowniku CAT, jednak nie będzie ona większa niż 2,5 W, podczas gdy dla sterownika tego dopuszczalną wartością są 3 W. Dla zabezpieczenia układu sterownik należy umieścić na radiatorze.

Ze względu na to, że każde ramię elektryczne układu pracuje przy innym prądzie, cały układ zasilania składa się z 6 regulowanych źródeł prądowych i niezależnej dla każdego źródła przetwornicy.

W układzie modelowym oprawy rozmieszczenie geometryczne diod zostało dobrane w sposób ułatwiający uniknięcie braków w układzie obszarów świecących dla poszczególnych temperatur barwowych. Jest to istotne ze względu na charakter układu optycznego modelu. Diody rozmieszczono równomiernie na konstrukcji pełniącej funkcję radiatora. Odległości między diodami dobrano, uwzględniając literaturę z zakresu gospodarki ciepłem w układach zbudowanych na bazie diod elektroluminescencyjnych mocy, m.in. [61] W trakcie przeprowadzonych testów nie zdiagnozowano nagrzewania się oprawy. Widok lampy oraz stanowisko do jej testowania przedstawiono na rysunku 20.

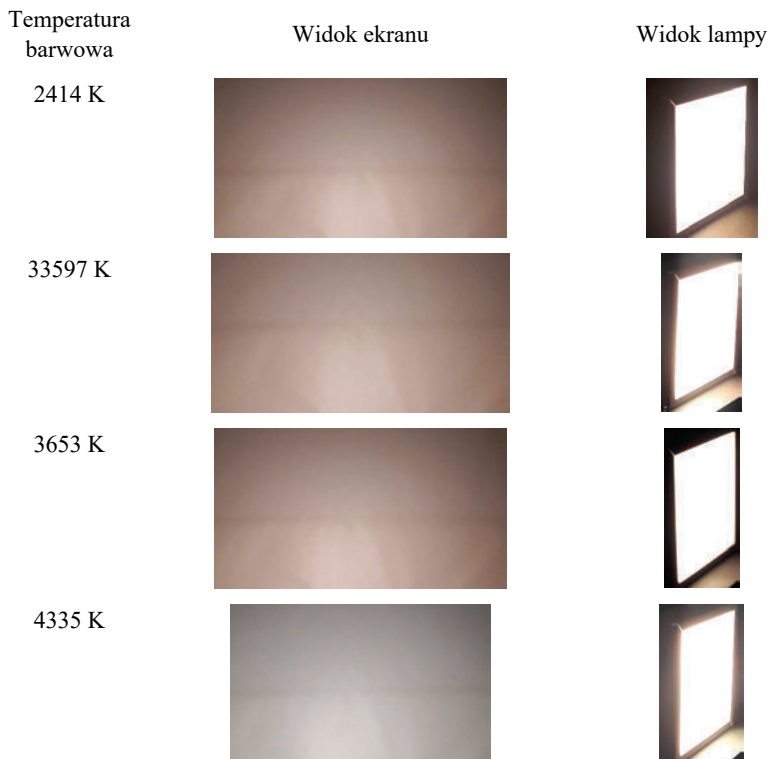


Rys. 20. Widok zbudowanego modelu lampy LED oraz stanowiska do testowania lampy w kierunku ekranu
Fig. 20. View of the constructed model of LED lamp and the laboratory stand in the direction of the screen

Poszczególne kanały lampy zasilano prądami o ustalonych natężeniach i oświetlano nią biały ekran oddalony od lampy o 2 m. Przykładowe efekty przedstawiono na fotografiach na rysunku 21.

Na stanowisku przeprowadzona została weryfikacja parametrów kolorymetrycznych uzyskanego światła. W tym celu przeprowadzono pomiary za pomocą miernika Konica Minolta CL-500, który umożliwia m.in. pomiar temperatury barwowej, współrzędnych kolorymetrycznych, ogólnego wskaźnika oddawania barw oraz szczegółowych wskaźników oddawania barw. Przykładowe wyniki pomiarów przedstawiono

w tabeli 2. Należy podkreślić, że uzyskane wyniki są zbieżne z wartościami uzyskanymi podczas przeprowadzonych symulacji.



Rys. 21. Fotografie ekranu w ciemni optycznej oświetlonego za pomocą zbudowanego modelu lampy przy wybranych różnych wartościach temperatury barwowej najbliższej oraz widok lampy w poszczególnych przypadkach.

Fig. 21. Images of the screen in the darkroom illuminated by the constructed luminaire model for selected values of correlated color temperatures and vie of the lamp

Tabela 2. Przykładowe wyniki pomiarów podstawowych parametrów kolorymetrycznych zbudowanego modelu lampy

Table 2. Basic colorimetric parameters of constructed luminaire model – exemplary measurements results

Temperatura barwowa wg symulacji	Temperatura barwowa zmierzona	R_a	R_9
2500	2414	93	82
3500	3597	95	90
3500	3653	94	96
4500	4335	92	92

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że zbudowany model lampy realizuje przestrajanie temperatury barwowej i utrzymuje wysokie i bardzo wysokie wartości wskaźników oddawania barw. Wybrany do realizacji układ z dyfuzorami zapewnia także bardzo dobre wymieszanie barw w polu dalekim (na ekranie oddalonym o 2 m od lampy). Na powierzchni dyfuzora lampy – ze względu na sprzężenie dyfuzor–źródła LED – podczas obserwacji z kierunku normalnego oraz przy małych kątach obserwacji widoczne są plamy świetlne wynikające ze wzoru rozmieszczenia diod w oprawie (rys. 22a), jednak obserwacja z kierunku normalnego nie zdarza się w typowych sytuacjach oświetleniowych. Im większy kąt obserwacji oprawy, tym mniejsza jest widoczność barwnych plam na powierzchni oprawy modelowej (rys. 22.b).



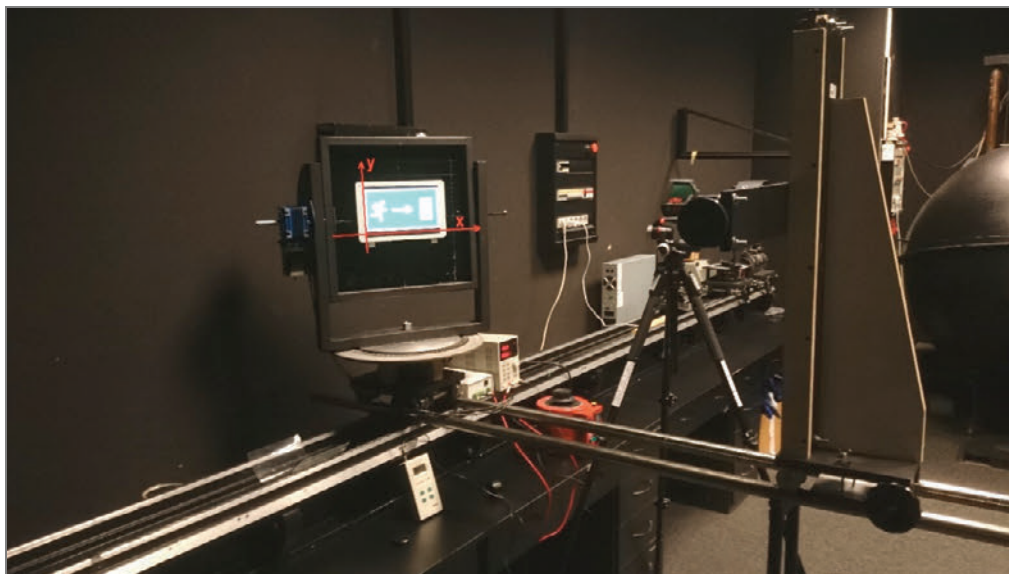
Rys. 22. Widok włączonej lampy dla ustawionej temperatury barwowej 3500 K:
a) z kierunku normalnego, b) pod kątem 30°

Fig. 22. View of the lamp when switched on for 3500 K:
a) from normal direction, b) from angle of 30°

3.2. MODEL OPRAWY OŚWIETLENIA AWARYJNEGO

Aktualnie dostępne urządzenia (wyświetlacze) mogą być wykonane w kilku technologiach. W technologii LCD wykorzystuje się ciekłe kryształy, które współpracują dodatkowo z systemami podświetlającymi, wykorzystującymi diody LED [6]. Od sposobu realizacji podświetlenia zależy równomierność rozkładu luminancji oraz tzw. „jasność” wyświetlacza. Technika emisji strumienia świetlnego z wykorzystaniem elementów OLED osiąga prawie dwa razy większą efektywność energetyczną urządzenia (skuteczność świetlna) niż ekrany typu LCD, ponieważ emisja światła w wyświetlaczach OLED jest bezpośrednia i nie wymaga stosowania tzw. backlight, z drugiej zaś strony wyświetlacze OLED charakteryzują się prawie dwa razy mniejszą luminancją.

Zbadanie krzywych światłości umożliwia stanowisko goniometryczne (rys. 23), zaopatrzone w układ goniometryczny ustawiony na ławie optycznej długości 5 m oraz wymienną głowicę fotometryczną, realizującą pomiar natężenia oświetlenia, luminancji i parametrów kolorymetrycznych.



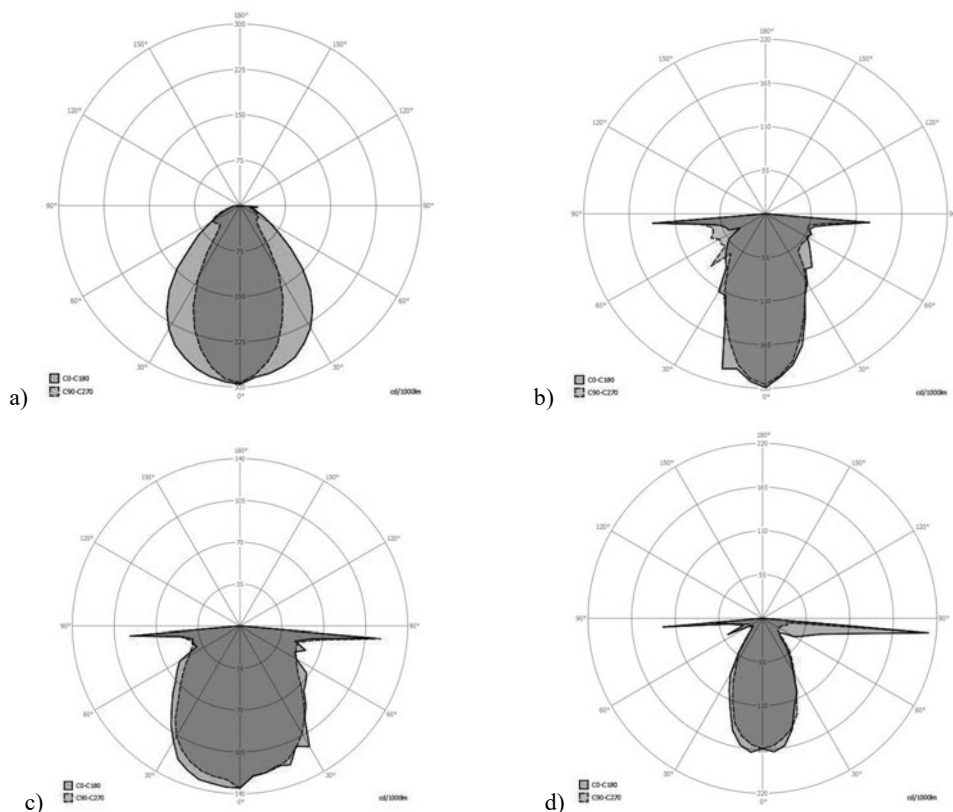
Rys. 23. Widok stanowiska pomiarowego do wyznaczania przestrzennego rozsyłu strumienia świetlnego i rozkładu luminancji półprzewodnikowych emiterów promieniowania

Fig. 23. View of the laboratory stand for investigation of spatial distribution of the luminous flux and luminance of semiconductor displays

Przestrzenny rozsył strumienia świetlnego w postaci krzywych światłości, zbadanych w dwóch płaszczyznach pracy C0-C180 i C90-C270, przedstawiają wykresy w układzie biegunowym (rys. 24).

Wybrano 4 typy różnych pod względem konstrukcji wyświetlaczy, zarówno w technologii TFT, IPS jak również AMOLED. Krzywe światłości zostały stabilizowane i opracowano cyfrowe zbiory przestrzennej emisji strumienia świetlnego w postaci plików typu LDT oraz IES, które wykorzystywane są w środowiskach obliczeniowych, tj.: DiaLux, ReLUX, Oxytech, TracePro, Photopia czy LightTOOLS. Analizując krzywe światłości badanych wyświetlaczy, można zaobserwować znaczący wzrost strumienia świetlnego dla kątów α większych niż 60° . Zjawisko to można wytłumaczyć tym, że szklane krawędzie ekranów zadziałały jak pryzmat, powodując załamanie wychodzącego światła oraz wzrost natężenia oświetlenia w tych obszarach.

W celu dokonania wstępnej oceny przydatności omawianych urządzeń do budowy oprawy oświetlenia awaryjnego przeprowadzono serię pomiarów spektralnych emiterów półprzewodnikowych dla wyświetlanej barwy białej, czerwonej, zielonej oraz niebieskiej. Po przeprowadzeniu niezbędnych obliczeń dokonano analizy zmian współrzędnych trójkromatycznych i temperatury barwowej oraz przesunięcia maksymalnej długości fali (dla barwy czerwonej, zielonej i niebieskiej) w funkcji kąta obserwacji wyświetlacza.



Rys. 24. Krzywe światłości wybranych półprzewodnikowych emiterów promieniowania:
 a) w technologii TFT-NEC, b) w technologii IPS-Apple, c) w technologii AMOLED-Samsung,
 d) w technologii IPS-Sony

Fig. 24. Luminous intensity curves of selected semiconductor displays:
 a) TFT-NEC technology, b) IPS-Apple technology, c) AMOLED-Samsung technology,
 d) IPS-Sony technology

Znaki bezpieczeństwa, w tym znaki kierunkowe, powinny spełniać wymagania odnośnie do zasad projektowania. Ważne jest spełnienie wymagań normy [62], a także wymagań PN-ISO 3864-1 dotyczącej właściwości kolorymetrycznych i fotometrycznych znaków bezpieczeństwa. Norma [63] reguluje dodatkowo międzynarodowy charakter i rozpoznawalność znaków ewakuacyjnych i ochrony przeciwpożarowej oraz wprowadza wiele nowych oznakowań służących ratowaniu życia ludzkiego. W normie [52] określono minimalne wymagania oświetleniowe, jakie powinny spełnić znaki bezpieczeństwa oświetlane zewnątrz lub wewnątrz. Piktogramy i znaki bezpieczeństwa, zgodnie z normą ISO 3864-1, powinny mieć tło o barwie zielonej (RAL 6032) i znak barwy białej, przy czym tło powinno zajmować minimum 50% powierzchni znaku bezpieczeństwa.

Luminancja dowolnej części znaku barwy białej i zielonej nie może być mniejsza niż 2 cd/m^2 . Równomierność barwnych części znaku, opisywana jako stosunek luminancji maksymalnej do minimalnej powierzchni jednobarwnej, nie może być większa niż 10:1. Wymagania normy [52] regulują również poziom kontrastu powierzchni białej i zielonej znaku bezpieczeństwa. Stosunek luminancji białej części znaku do luminancji tła powinien być nie mniejszy niż 5:1 i nie większy niż 15:1.

Eksperyment polegał na wyświetleniu kolejno barwy białej, czerwonej, zielonej oraz niebieskiej, używając do tego celu aplikacji ScreenRGB. Przy ustalonej, stałej odległości głowicy spektrometru światłowodowego StellarNet Blue Wave dokonywano rejestracji rozkładu spektralnego emitowanego promieniowania wyświetlanych kolejno barw, zmieniając ustawienie głowicy spektrometru co 10 stopni w dwóch wzajemnie prostopadłych płaszczyznach. W trakcie wykonywania pomiarów urządzenia były zasilane z sieci. Jasność wyświetlaczy była ustawiona na maksymalną wartość, a parametry bieli ustawione fabrycznie dla konkretnego wyświetlacza.

Temperaturę barwową najbliższą stanowi temperatura ciała czarnego wytwarzającego promieniowanie o chromatyczności najmniej różniącej się od chromatyczności badanego źródła. Oznacza to, że przed ustaleniem temperatury barwowej najbliższej badanego źródła o rozkładzie spektralnym promieniowania $S(\lambda)$ należy określić jego współrzędne trójchromatyczne:

$$\begin{aligned} x &= \frac{X}{X+Y+Z} \\ y &= \frac{Y}{X+Y+Z} \\ z &= \frac{Z}{X+Y+Z} \end{aligned} \quad (14)$$

gdzie:

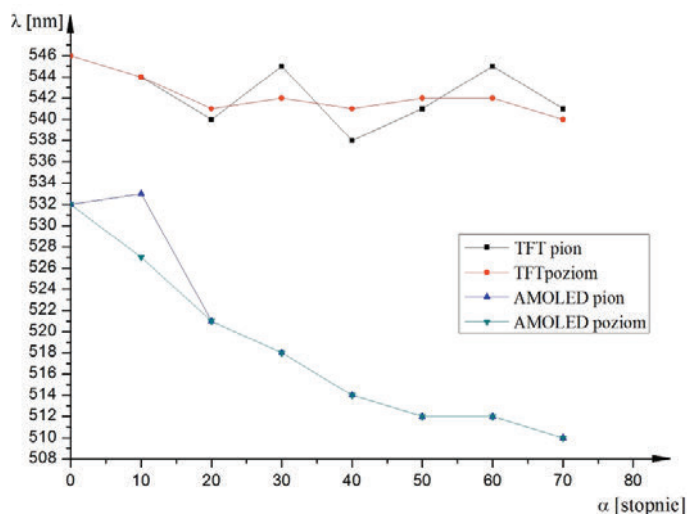
$$\begin{aligned} X &= \sum_K^L S(\lambda) \tilde{x}(\lambda) \Delta\lambda \\ Y &= \sum_K^L S(\lambda) \tilde{y}(\lambda) \Delta\lambda \\ Z &= \sum_K^L S(\lambda) \tilde{z}(\lambda) \Delta\lambda \end{aligned} \quad (15)$$

Współrzędne trójchromatyczne oraz wskaźnik oddawania barw R_a obliczone zostały zgodnie z ogólnie przyjętymi zasadami. Wyniki obliczeń zestawione zostały na wykresach.

Znając rozkłady spektralne promieniowania emitowanego przez wyświetlacze (zarówno przy wyświetlaniu barwy monochromatycznej czerwonej, zielonej i niebieskiej,

jak i bieli), można ocenić badane urządzenie pod względem kolorymetrycznym z ukięrowaniem na możliwość aplikacji wyświetlacza w oświetleniu awaryjnym. W tym celu wyznaczone zostały takie parametry, jak: długość fali, dla której ma miejsce maksimum emisji barwy zielonej, współrzędne trójkromatyczne, temperatura barwowa najbliższa oraz wskaźnik oddawania barw. Określono zmiany wymienionych parametrów w funkcji kąta obserwacji. Przeanalizowano także zmiany luminancji urządzeń w funkcji kąta obserwacji.

Na rysunku 25 przedstawione są krzywe ukazujące zależność długości fali, dla której w spektrum promieniowania występuje maksimum emisji dla monochromatycznej barwy zielonej, w zależności od kąta obserwacji powierzchni urządzenia.

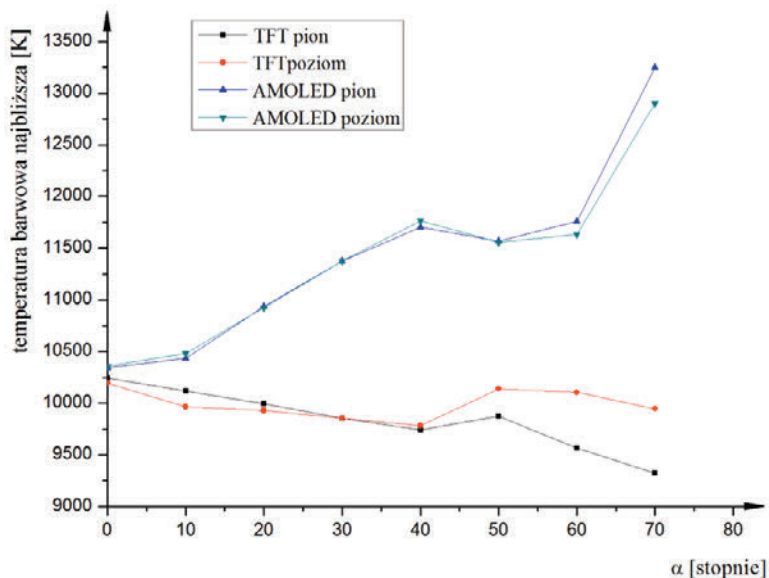


Rys. 25. Zależności długości fali, dla których występuje maksimum emisji promieniowania przy wyświetlaniu monochromatycznej barwy zielonej, w zależności od kąta obserwacji α

Fig. 25. Dependency of the wavelength and viewing α angle when peak of the emission when monochromatic radiation is displayed

Analiza krzywych przedstawionych na rysunku 25 wskazuje znaczące zmiany długości fali, dla której występuje maksimum emisji barwy zielonej, w przypadku matrycy typu AMOLED [64]. Niezależnie od orientacji wyświetlacza, dla obserwacji z kierunku normalnego największa ilość energii emitowanego promieniowania przypada na długość fali 532 nm. Dla orientacji poziomej maksimum to przesunęło się w kierunku fal krótszych w sposób monotoniczny, aby dla obserwacji pod kątem 70° osiągnąć 510 nm. W przypadku pionowej orientacji wyświetlacza długość fali, dla której emitowana jest największa ilość energii najpierw nieznacznie wzrasta (dla 10° – 533 nm), aby następnie zacząć zmniejszać się. W zakresie kąta obserwacji 20–70° obie krzywe pokrywają się.

W przypadku wyświetlacza typu TFT nie występują tak znaczące zmiany długości fali, na którą przypada maksymalna wartość spektralnej gęstości emitowanego strumienia. Zmiany te wahają się w zakresie długości fal od 539 do 546 nm (dla orientacji poziomej zakres zmian jest jeszcze mniejszy). Oznacza to, że w przypadku matrycy TFT można powiedzieć o większej stabilności barwy w funkcji kąta obserwacji niż w przypadku urządzenia typu AMOLED. Ponadto dla urządzenia typu AMOLED barwie zielonej odpowiadają długości fal krótsze niż w przypadku urządzeń TFT.



Rys. 26. Wykres zależności temperatury barwowej najbliższej wyświetlacza przy różnych kątach obserwacji α

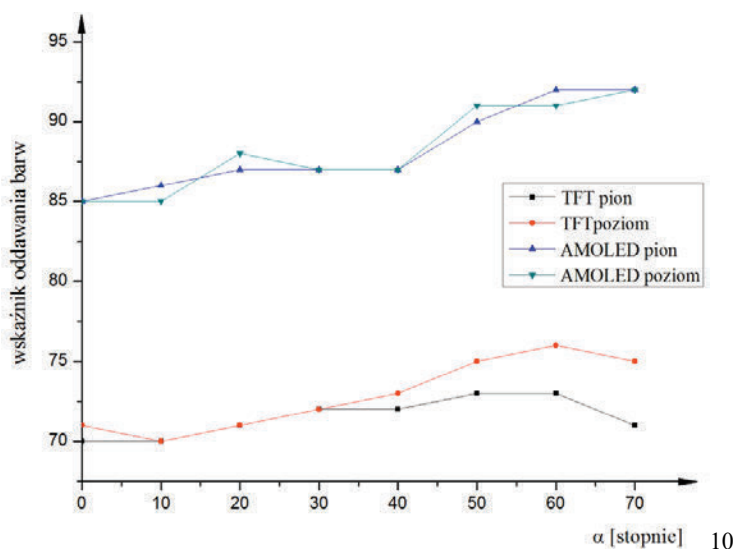
Fig. 26. Dependency of the correlated color temperature of the display for various viewing angles α

Przedmiotem kolejnych analiz była temperatura barwowa. Wyniki przeprowadzonych obliczeń przedstawione są w formie graficznej na rysunku 26. Analiza otrzymanych zależności wykazała, że temperatura barwowa najbliższa nie jest stała w funkcji kąta obserwacji dla żadnego z analizowanych urządzeń. W przypadku wyświetlacza typu AMOLED wzrasta ona w sposób monotoniczny wraz ze zwiększaniem kąta obserwacji od wartości ok. 10 350 K do ok. 13 000 K, przy czym dla orientacji poziomej osiągnięta wartość maksymalna jest większa o około 350 K niż dla orientacji pionowej.

W przypadku wyświetlacza typu TFT zależność temperatury barwowej najbliższej w funkcji kąta obserwacji urządzenia jest odwrotna, tzn. temperatura barwowa spada wraz ze wzrostem kąta α aż do 40°. Następnie nieznacznie wzrasta dla kąta 50°, aby dla większych kątów obserwacji ponownie obniżyć. Jest to wynikiem ułożenia skośnego dipoli ciekłego kryształu (charakterystyczne w technologii MVA). Dla pionowej orien-

tacji urządzenia temperatura barwowa najbliższa przy obserwacji z kierunku normalnego wynosi ok. 10200 K, natomiast dla orientacji poziomej jest o około 50 K większa. Temperaturowe dla obu orientacji urządzenia zrównują się dla kąta obserwacji 35°, po czym dla orientacji pionowej temperatura rośnie szybciej niż dla orientacji poziomej. Maksymalne osiągnięte dalej wartości wynoszą około 10150 K (pionowo) i niespełna 9900 K (poziomo), a dalszy spadek temperatury barwowej jest większy dla orientacji poziomej – dla kąta obserwacji wynoszącego 70° temperatura barwowa wynosi nieco ponad 9300 K, podczas gdy dla orientacji pionowej niespełna 10 000 K.

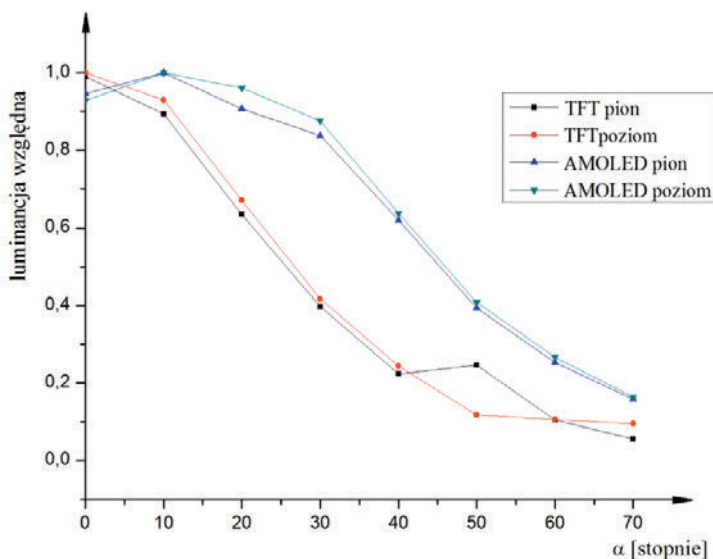
Reasumując, wyświetlacz typu AMOLED charakteryzuje się około 15% wzrostem temperatury barwowej wraz ze wzrostem kąta obserwacji wyświetlacza, a jej wartości są niezależne od orientacji wyświetlacza. W przypadku urządzenia TFT ustawienie urządzenia wpływa na osiągnięte wartości temperatury barwowej. Dla orientacji poziomej wartość maksymalna jest osiągnięta podczas obserwacji z kierunku normalnego, a dla orientacji pionowej największe temperatury barwowe są obserwowane dla kierunku normalnego i około 50°. Różnica pomiędzy wartością maksymalną a minimalną w drugim przypadku (pionowo) wynosi ok. 350 K, natomiast w pierwszym (poziomo) ponad 900 K, a zatem jest rozróżniana przez oko.



Rys. 27. Wykres zależności wskaźnika oddawania barw przy różnych kątach obserwacji α
 Fig. 27. Dependency of the color rendering index of the display for various viewing angles α

Kolejnym analizowanym parametrem był wskaźnik oddawania barw. Wykresy zmian wskaźnika R_a w funkcji kąta obserwacji oraz orientacji urządzenia przedstawione są na rysunku 27. W przypadku matrycy TFT obliczony wskaźnik oddawania barwy dla obserwacji z kierunku normalnego wnosi ok. 70, a następnie wzrasta, by dla

obserwacji pod kątem 60° osiągnąć wartość maksymalną (ok. 75, dla orientacji pionowej R_a wyższe niż dla poziomej), po czym nieznacznie spada. Wyświetlacz typu AMOLED charakteryzuje znacznie wyższa wartość wskaźnika oddawania barw – dla obserwacji z kierunku normalnego jest to 85 i wraz ze wzrostem kąta obserwacji rośnie do ponad 90 dla kąta 70° .



Rys. 28. Zależność względnej luminancji wyświetlacza w funkcji kąta obserwacji α
 Fig. 28. Dependency of relative luminance for various viewing angles α

Oprócz wymienionych wyników obliczeń warto nadmienić, że badane wyświetlacze charakteryzowały się również zróżnicowanym rozsyłem strumienia świetlnego. Na rysunku 28 przedstawione zostały charakterystyki względne luminancji wyświetlacza w funkcji kąta.

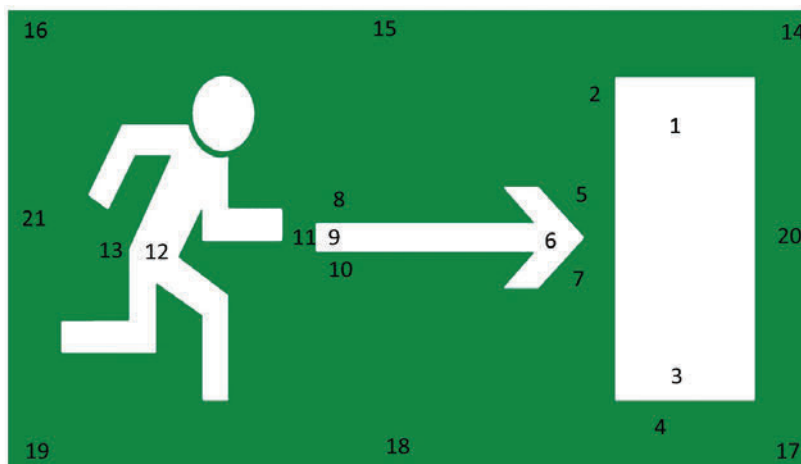
Uzyskane charakterystyki wskazują, że sposób rozsyłu obu typów wyświetlaczy różni się od siebie. Zasadnicza różnica pomiędzy nimi polega na tym, że dla urządzenia typu AMOLED spadek luminancji o 50% uzyskiwany jest dla kąta obserwacji około 45° , podczas gdy w przypadku urządzenia typu TFT przypada on na około 25° . Innymi słowy urządzenia typu AMOLED charakteryzują się znacznie szerszą bryłą fotometryczną, a jej kształt jest właściwie obrotowo-symetryczny. Dla kąta obserwacji 60° luminancja wyświetlacza AMOLED spada do około 20% wartości maksymalnej. Taki spadek w przypadku wyświetlacza typu TFT zachodzi już podczas obserwacji pod kątem 40° . Dalej dla orientacji poziomej luminancja nieznacznie zwiększa się, natomiast dla orientacji pionowej kontynuowany jest monotoniczny jej spadek do poziomu 10% dla 50° [64].

Wyselekcjonowano emitery w technologiach TFT, IPS i AMOLED o przekątnych około 10" i stosunku boków 16:9. Urządzenia wyświetlające zawierały układy sterowania z systemem Android, co umożliwiło opracowanie aplikacji do uproszczenia procesów badawczych, zarówno pod względem pomiarów fotometrycznych, jak też analizy transmisji sygnałowej [65]. Właściwości techniczne wyświetlaczy wybranych do badania zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Właściwości techniczne wyświetlaczy
Table 3. Technical properties of displays

	Urządzenie A	Urządzenie B	Urządzenie C
Technologia wyświetlacza	TFT HD LED	TFT IPS 2	Super AMOLED
Przekątna	10,1"	10,1"	10,5"
Rozdzielczość ekranu	1024×600	1920×1200	2560×1600
Wymiar ekranu	255×160 mm	255×160 mm	246×176 mm

Na każdym z urządzeń wyświetlono ten sam znak (rys. 29) i zmierzono iloraz luminancji białego tła do luminancji części barwnej znaku pod kątem zgodności z wymaganiami [64]. Sprawdzone także, czy luminancja na całej powierzchni wyświetlanego znaku wynosiła co najmniej 2 cd/m^2 . Punkty pomiarowe były rozłożone na całej powierzchni wyświetlanego znaku zgodnie z wytycznymi zawartymi w wymaganiach normy PN-EN 60598-2-22. Wyświetlany znak oraz punkty pomiarowe pokazano na rysunku 29.



Rys. 29. Znak wyświetlany na urządzeniach wraz z zaznaczonymi punktami pomiarowymi
Fig. 29. Sign displayed by the tested devices with measurement points marked

Iloraz luminancji białego tła znaku bezpieczeństwa do luminancji części barwnej powinien wynosić minimalnie 5:1 i maksymalnie 15:1. Iloraz luminancji wylicza się dla sąsiednich pól pomiarowych z części białej oraz barwnej. Pomiary luminancji znaków bezpieczeństwa wykonano miernikiem luminancji LS-110 firmy Konica Minolta dla każdego z rozpatrywanych urządzeń (A, B i C).

Na podstawie analizy wyników można stwierdzić, że urządzenie A nie spełnia warunków przedstawionych w regulacji PN-EN 60598-2-22[6]. W wielu punktach wartości ilorazów luminancji nie mieszczą się w ustalonych wymaganiach. W związku z tym urządzenie A nie nadaje się do wykorzystania jako oprawa awaryjna. Zdecydowano nie kontynuować dalszych pomiarów fotometrycznych urządzenia A.

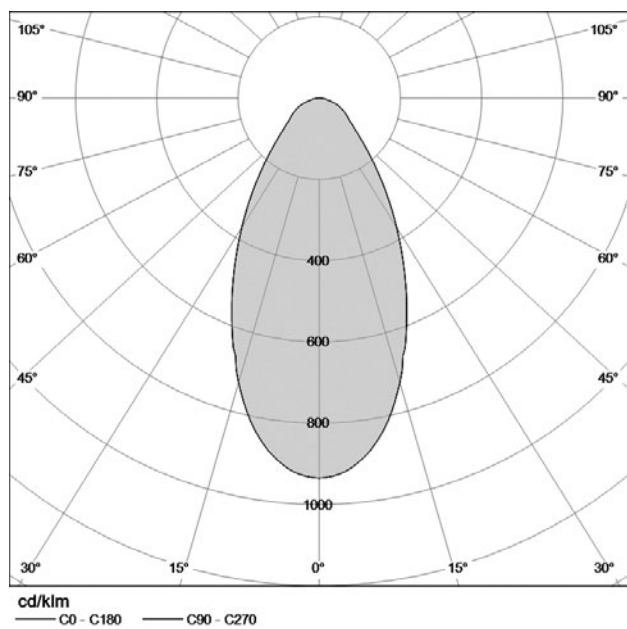
Urządzenia B oraz C, ze względu na rozkłady luminancji odpowiadające wymaganiom normatywnym, zostały zakwalifikowane do dalszych pomiarów fotometrycznych.

Kolejnym etapem badań fotometrycznych był pomiar krzywych światłości oraz strumienia świetlnego urządzeń B i C. W tym celu na każdym ekranie wyświetlono piktogram z rysunku 29, a emiter mocowano na goniometrze. Goniometr umożliwiał obrót badanego ekranu w płaszczyźnie poziomej oraz pionowej. Mechanizm goniometru umożliwiał automatyczne wykonywanie pomiaru po zmianie kąta ustawienia wyświetlacza. W odległości przekraczającej minimalną odległość fotometryzowania, w tym przypadku 1,5 metra, w osi optycznej prostopadłej do powierzchni ekranu ustawiono głowicę luksomierza. Podczas pomiaru głowica luksomierza pozostawała nieruchomo, natomiast zautomatyzowany napęd goniometru w geometrii $A-\alpha$ przemieszczał kątowo badany wyświetlacz w osi poziomej ($\pm 90^\circ$) z krokiem co 1° oraz w osi pionowej ($\pm 75^\circ$) z krokiem co 15° . Pomiar odbywał się po ustabilizowaniu wskazań na luksomierzu w trakcie postoju ramy goniometru. Całość układu pomiarowego ustawiono na ławie fotometrycznej.

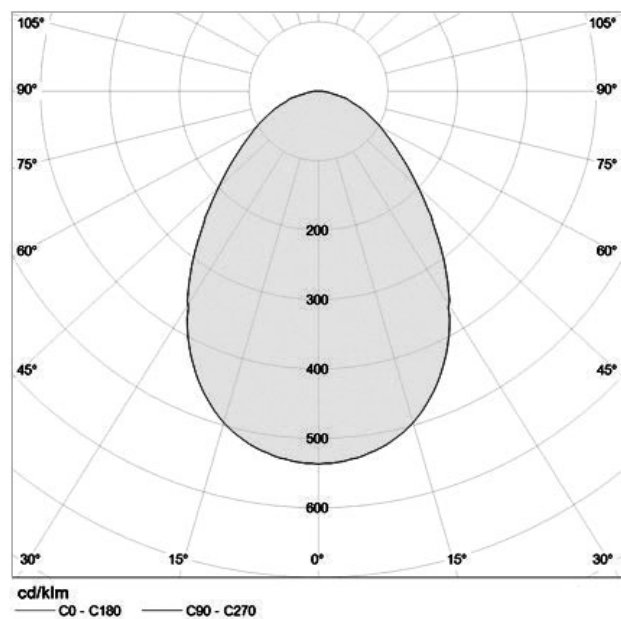
Na rysunkach 30 oraz 31 przedstawiono krzywe światłości zbadanych urządzeń (B i C). Pomiar wykonano w płaszczyźnie pionowej w zakresie $\pm 90^\circ$ z krokiem co 15° , natomiast w płaszczyźnie poziomej w zakresie $\pm 75^\circ$ z krokiem co 1° .

Analizując wyniki, stwierdzono obrotową symetrię bryły światłości obu urządzeń. Całkowity strumień świetlny badanych emiterów został obliczony na podstawie informacji o przestrzennym rozsyłaniu światłości, przez wykorzystanie metody strumieni cząstkowych, przy czym całkowity strumień świetlny urządzenia B wyniósł $\Phi_B = 3$ lm, całkowity zaś strumień świetlny urządzenia C wyniósł $\Phi_C = 10$ lm.

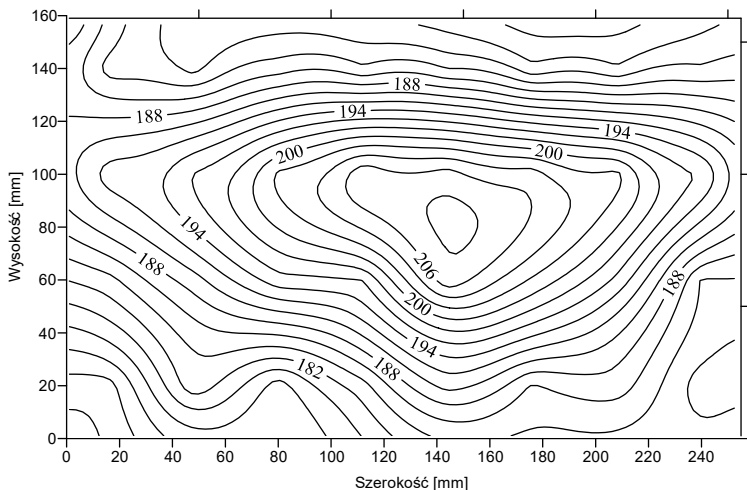
Następnie zmierzono rozkład luminancji na powierzchni badanego powierzchniowego emitera półprzewodnikowego, emitującego wyłącznie jednolity obraz (ekran emitujący światło białe przy ustawieniu kontrastu i jasności na maksimum), dający ocenę równomierności emisji światła z powierzchni piktogramu. Pomiaru dokonano miernikiem luminancji LS-110. Rozkład luminancji przedstawiono na rysunkach 32 oraz 33, przy czym „wysokość” dotyczy analizy w kierunku osi y , „szerokość” zaś w kierunku osi x .



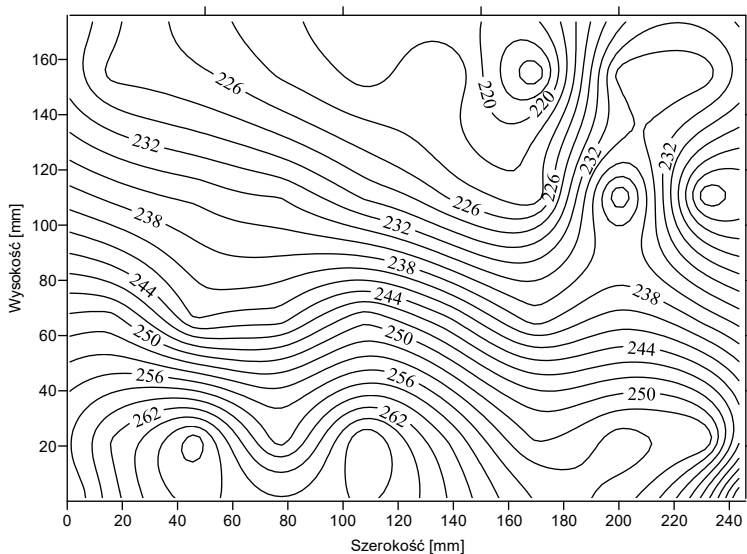
Rys. 30. Krzywa światłości urządzenia B
 Fig. 30. Luminous intensity distribution for device B



Rys. 31. Krzywa światłości urządzenia C
 Fig. 31. Luminous intensity distribution for device C



Rys. 32. Izolinie rozkładu luminancji urządzenia B (wartości w cd/m^2)
 Fig. 32. Isolines of luminance distribution for device B (in cd/m^2)



Rys. 33. Izolinie rozkładu luminancji urządzenia C (wartości w cd/m^2)
 Fig. 33. Isolines of luminance distribution for device C (in cd/m^2)

Równomierność luminancji wyświetlacza B:

$$U_{0A} = \frac{L_{\min}}{L_{\text{sr}}} = \frac{189,92}{173,20} = 0,91$$

Równomierność luminancji wyświetlacza C:

$$U_{0C} = \frac{L_{\min}}{L_{\text{sr}}} = \frac{239,72}{220,00} = 0,92$$

Analizując wyniki pomiarów, stwierdzono, że urządzenia B oraz C, nadają się do zastosowania jako oprawy awaryjne, ze względu na poziom i kontrast luminancji. Oba wyświetlacze charakteryzują się wysoką równomiernością luminancji ekranu. Dodatkowo w prawidłowy sposób odzwierciedlają barwy. Widoczność znaków bezpieczeństwa wyświetlane przez te urządzenia są czytelne z odległości 20 metrów [66].

Wyświetlacze tych urządzeń charakteryzują się jednak na tyle małą wartością strumienia świetlnego, że zrealizowanie zadania oświetleniowego staje się poważnie utrudnione. Jednak urządzenia te można wykorzystać jako wyświetlacze znaków bezpieczeństwa, ponieważ spełniają one także warunki opisane w normie [62].

Na podstawie uzyskanych wyników pomiaru zdecydowano się zdyskwalifikować jedno urządzenie, gdyż nie spełniało ono wymagań fotometrycznych stawianych przez normę [52]. Dwa pozostałe urządzenia uzyskały pozytywne oceny badań i można je użyć jako oprawy oświetlenia awaryjnego. Jednakże po przeprowadzeniu analiz wiadać, że strumienie świetlne tych wyświetlaczy są stosunkowo małe. Oznacza to, że zrealizowanie na ich podstawie zadania oświetleniowego awaryjnego byłoby technicznie utrudnione. Warto zauważyć, że zrealizowane pomiary potwierdzają możliwość sterowania bezprzewodowego testowanych urządzeń. Aplikacja, przygotowana w systemie Android, ułatwia przesłanie dowolnie wybranego znaku bezpieczeństwa, istnieje więc uniwersalność ich zastosowania w praktyce [67].



Rys. 34. Opracowana oprawa oświetlenia awaryjnego
w rzeczywistych warunkach pracy

Fig. 34. Developed emergency luminaire in real environment

4. PODSUMOWANIE

Opracowanie i rozwój technologii diod elektroluminescencyjnych dużej mocy pociągnęły za sobą znaczące zmiany w technice świetlnej. Najistotniejszą z nich wydaje się wysoka energooszczędność w użytkowaniu tych źródeł światła, wynikająca z ich wysokiej sprawności rozumianej jako relację pomiędzy ilością wytworzonego światła do zużywanej mocy elektrycznej. Ze względu na znaczną energochłonność instalacji oświetlenia w budynkach osoby odpowiedzialne za ich projektowanie oraz administrowanie chętnie sięgają po LED-owe zamienniki tradycyjnych źródeł światła. Wykonanie obliczeń projektowych z użyciem typowych programów komputerowych nie budzi zastrzeżeń, jeśli bryła fotometryczna urządzeń oświetleniowych wykorzystujących diody elektroluminescencyjne jest poprawnie zdefiniowana, jednak nie uwzględniają one wielu nowych problemów dostrzeżonych w ostatnich latach w związku ze stosowaniem źródeł półprzewodnikowych. Cechy tych źródeł (budowa, sposób rozsyłu promieniowania i kształt charakterystyki spektralnej) powodują między innymi, że 2 z 3 podstawowych kryteriów projektowych wydają się błędne dla typowych diod stosowanych w oprawach oświetleniowych. Jest to kryterium jakości oddawania barw oraz ograniczenia olśnienia przykrego.

Nowa wersja wskaźnika oddawania barw od wielu lat stanowi obiekt badań – na przestrzeni ostatnich 50 lat pojawiło się około 30 metod oceny bieli, przy czym tylko nieliczne z nich zostały uznane w środowisku naukowym jako warte przekazania do praktyki inżynierskiej i znalazły odzwierciedlenie w normach. Pojawienie się diod elektroluminescencyjnych ponownie wymusiło przeanalizowanie tego problemu, ponieważ obliczenia prowadzone metodą wskaźnika R_a prowadziły do błędnych wniosków. W roku 2017 Międzynarodowa Komisja Oświetleniowa przyjęła nową metodę oceny jakości barwy światła białego, zastępując metodę R_a wskaźnikiem R_f . W opracowaniu wyjaśniono, czym różnią się te metody. Warto jednak zwrócić uwagę, że pewne konstrukcje opraw wykorzystujących diody elektroluminescencyjne mogą być charakteryzowane poprawnie także metodą R_a . Jest tak w przypadku przedstawionego w niniejszym opracowaniu modelu oprawy o przestrajalnej temperaturze barwowej. Oprawa taka zbudowana jest z diod o różnych charakterystykach spektralnych, przez co promieniowanie wypadkowe ma widmo zbliżone do radiatora Planckowskiego o zakładanej temperaturze. W takim przypadku można stosować obie metody, tym bardziej że metoda ze wskaźnikiem R_a jest nadal obowiązującą metodą oceny barwy produktów dostępnych na rynku.

Drugim czynnikiem, który powinien zostać przedefiniowany w wyniku powszechnego stosowania opraw LED-owych jest wskaźnik olśnienia. Wykonany szeroki przegląd literatury wskazuje kierunki badań realizowanych na świecie w zakresie metody definiowania tego wskaźnika w przypadku technologii półprzewodnikowej. Zagadnienie to jest bardzo złożone i wciąż otwarte zarówno w sensie definicyjnym, jak również w zakresie techniki pomiaru.

Energooszczędne źródła półprzewodnikowe mogą być stosowane nie tylko do celów oświetlenia ogólnego. Zaprezentowane rozwiązanie oprawy ewakuacyjnej zbudowanej na bazie wyświetlacza wskazuje na możliwe zastosowanie masowo stosowanych wyświetlaczy (w tabletach i smartfonach), ponieważ parametry kolorymetryczne tych urządzeń umożliwiają takie ich wystrojenie, by spełniały wymagania dotyczące barw stosowanych w tego typu oprawach. Wykazano także, że wystarczający jest również emitowany przez nie strumień świetlny.

Opracowano na podstawie wyników prac realizowanych w Katedrze Elektroenergetyki, Fotoniki i Techniki Światłowej w ramach pracy statutowej S/WE/4/13 oraz III etapu programu wieloletniego *Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy*, finansowanego w latach 2014–2016 ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego/Narodowego Centrum Badań i Rozwoju – PW/BWP/WE/1/2014. Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy. Wykonawca projektu: Politechnika Białostocka.

LITERATURA

- [1] *Research Roadmap for Healthful Interior Lighting Applications*, CIE 218:2016.
- [2] ZAJKOWSKI M., BUDZYŃSKI Ł., Zgłoszenie patentowe P.416671 pt., *System oświetleniowy LED oraz oprawa oświetleniowa LED*.
- [3] SZYMANIUK A., ZAREMBA K., *Wpływ geometrii oprawy soczewkowej LED na jej parametry świetlne*, Przegląd Elektrotechniczny, 2014, R. 90, nr 2.
- [4] *Measurements of LEDs*, CIE 127:2007 2nd edition.
- [5] *Test method for LED lamps, LED luminaires and LED modules*, CIE International Standard S 025/E:2015.
- [6] ZAJKOWSKI M., *Właściwości fotometryczne wyświetlaczy LCD*, Przegląd Elektrotechniczny, 2008, 210–213, nr 08.
- [7] PN-EN ISO 13406-2:2002, *Wymagania ergonomiczne dotyczące pracy biurowej z zastosowaniem monitorów ekranowych z płaskim ekranem – Część 2: Wymagania ergonomiczne dotyczące monitorów z płaskim ekranem*.
- [8] PN-EN ISO 9241-305:2009, *Ergonomia interakcji człowieka i systemu – Część 305: Metody laboratoryjnych badań optycznych monitorów ekranowych elektronicznych*.
- [9] BŁASZCZAK U., GRYKO Ł., ZAJĄC A., *Zastosowanie diod LED do poprawy warunków pracy wzrokowej*, [w:] *Problemy metrologii elektronicznej i fotonicznej*, pod red. J. Mroczki, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2015.
- [10] *Colour Fidelity Index for accurate scientific use*, CIE 224:2017.
- [11] *IES Method for Evaluating Light Source Color Rendition*, IES Standard, 2015.
- [12] *Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources*, CIE 13.3-1995.
- [13] *Evaluating Color Rendition Using IES TM-30-15*, U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy, Washington, 2015 (on-line).
- [14] PN-EN 12464-1:2012, *Światło i oświetlenie. Oświetlenie miejsc pracy. Część 1: Miejsca pracy we wnętrzach*.
- [15] *Discomfort Glare in Interior Lighting*, CIE 117-1995.
- [16] CLEAR R.D., *Discomfort glare, what do we actually know?* Lighting Research and Technology, 2012, 0, p. 1–18.

- [17] HARA N., *Visual characteristics for evaluating the discomfort glare – relationship between the position, size, array of the LED chips, and BCD on the discomfort glare*, Proceedings of CIE 2016, Lighting Quality and Energy Efficiency, Melbourne, Australia, 2016, p. 704–707.
- [18] EBERBACH K., *Der Einfluss der Leuchtdichtestruktur von Lichtquellen auf die Blendempfindung*, Lichttechnik, 1975, 6, p. 283–286.
- [19] WATERS C.E., MISTERICK R.G., BERNECKER C.A., *Discomfort Glare from Sources of Non-uniform Luminance*, Journal of the Illuminating Engineering Society, 1995, 24(2), p. 73–85.
- [20] KASAHARA T., AIZAWA D., IRIKURA T., MORIYAMA T., TODA M., IWAMOTO M., *Discomfort Glare Caused by White LED Light Source*, Journal of Light and Visual Environment, 2006, 30(2), p. 49–57.
- [21] TAKAHASHI H., IRIKURA T., MORIYAMA T., TODA M., IWAMOTO M., *Discomfort glare and annoyance caused by white LED lamps*, Proceedings of the 26th Session of the CIE, Beijing, China, 2007, p. D1-80–D1-83.
- [22] LEE CH.-M., KIM H., CHOI D.-S., *A Study on the Estimation of Discomfort Glare for LED Luminaires*, Proceedings of the 26th Session of the CIE, Beijing, China, 2007, p. D3-33–D3-36.
- [23] JUNG S.-G., CHO Y.-I., KIM H., *A Study of UGR for Non-Uniform Luminance Source*, Proceedings of Lux Europa 2009, Istanbul, Turkey, 2009, p. 553–558.
- [24] KIM W., KIM J.T., *The scope of the glare light source of the window with non-uniform luminance distribution*, Proceedings of 3rd International Symposium on Sustainable Healthy Buildings, Seoul, Korea, 2010, p. 253–271.
- [25] TASHIRO T., KIMURA-MINODA T., KOHKO S., ISHIKAWA T., AYAMA M., *Discomfort Glare Evaluation to White LEDs with Different Spatial Arrangement*, Proceedings of the 27th Session of the CIE, Sun City, South Africa, 2011, p. 583–588.
- [26] BULLOUGH J.D., *Luminance versus luminous intensity as metric for discomfort glare*, SAE International, 2011.
- [27] BULLOUGH J.D., SWEATER HICKOX K., *Interactions among light source luminance, illuminance and size on discomfort glare*, SAE International, 2012.
- [28] ERDEM L., TRAMPERT K., NEUMANN C., *Evaluation of Discomfort Glare from LED lighting systems*, Proceedings of Balkan Light 2012, Belgrade, 2012, p. 213–220.
- [29] HARA N., HASEGAWA S., *Study on Discomfort Glare Rating on the Luminaire with LED Array*, Journal of Illuminating Engineering Institute Japan, 2012, 96(2), p. 81–88.
- [30] AYAMA M., TASHIRO T., KAWANOBE S., KIMURA-MINODA T., KOHKO S., ISHIKAWA T., *Discomfort glare of white LED sources of different spatial arrangements*, Proceedings of the CIE Centenary Conference, Paris, France, 2013, p. 119–122.
- [31] FUNKE C., SCHIERZ CH., *Untersuchungen zur Erweiterung des UGR-Blendungsbewertungsverfahrens für strukturierte LED-Leuchten*, Proceedings of LICHT 2014, The Hague, The Netherlands, 2014, p. 129–134.
- [32] GEERDINCK L.M., VAN GHELUWE J.R., VISSENBERG M.C.J.M., *Discomfort glare perception of non-uniform light sources in an office setting*, Journal of Environmental Psychology, 2014, 39, p. 5–13.
- [33] GEERDINCK L., *Discomfort Glare Perception of Non-Uniform Light Sources in an Office Setting*, LED professional Review, 2014, (44), p. 58–62.
- [34] DONNERS M.A.H., VISSENBERG M.C.J.M., GEERDINCK L.M., VAN DEN BROEK-COOLS J.H.F., BUDDEMEIJER-LOCK A., *A psychophysical model of discomfort glare in both outdoor and indoor applications*, Proceedings of 28th Session of the CIE, Manchester, UK, 2015, p. 1602–1611.
- [35] FUNKE C., SCHIERZ CH., *Extension of the Unified Glare Rating Formula for Non-Uniform LED Luminaires*, Proceedings of 28th session of the CIE, Manchester, UK, 2015, p. 1471–1480.
- [36] IXTAINA P., PRESSO M., ROSALES N., MARIN G.H., *Glare by Light Emitting Diode (LED) vehicle traffic signals*, International Journal of Mechanical & Material Engineering, 2015, 10:1.

- [37] Scheir G.H., Hanse, aer P., Bracke P., Deconinck G., Ryckaert W.R., *Calculation of the Unified Glare Rating based on luminance maps for uniform and non-uniform light sources*, Building and Environment, 2015, 84, p. 60–67.
- [38] YANG Y., MA S.N., LOU M.R., LIU X.Y., *Discomfort glare by non-uniform white LED matrices*, Proceedings of the 28th Session of the CIE, Manchester, UK, 2015, p. 393–399.
- [39] YANG Y., LOU M.R., MA S.N., LIU X.Y., *Assessing glare. Part 1: Comparing uniform and non-uniform LED luminaires*, Lighting Research & Technology, 2015, 0, p. 1–16.
- [40] HIGASHI H., KOGA S., KOTANI T., *The development of evaluation for discomfort glare in LED lighting of indoor workplace. The effect of the luminance distribution of luminous parts on subjective evaluation*, Proceedings of the CIE Centenary Conference, Paris, France, 2013, p. 648–656.
- [41] TASHIRO T., KAWANOBE S., KIMURA-MINODA T., KOHKO S., ISHIKAWA T., AYAMA M., *Discomfort glare for white LED light sources with different spatial arrangements*, Lighting Research & Technology, 2015, 47, p. 316–337.
- [42] EBLE-HANKINS M.L., *Subjective Impression of Discomfort Glare from Sources of Non-Uniform Luminance*, rozprawa doktorska, University of Nebraska at Lincoln, Lincoln, Nebraska, Architectural Engineering, 2008.
- [43] NIEDLING M., VOLKER ST., KNOOP M., BOHM M., *LED's in der Strassenbeleuchtung – wahrnehmbar oder nicht?*, Proceedings of LICHT 2014, The Hague, The Netherlands, 2014, p. 450–455.
- [44] ŠKODA J., SUMEC S., BAXANT P., KRBAL M., PARMA M., *Measurement of discomfort glare through luminance analyser*, Proceedings of the 28th Session of the CIE, Manchester, UK, 2015, p. 1373–1381.
- [45] CHEN M.K., CHOU C.J., CHEN H.S., *Assessment of glare rating from non-uniform light sources*, Proceedings of CIE 2016 “Lighting Quality and Energy Efficiency”, Melbourne, Australia, 2016, p. 697–703.
- [46] KOGA S., HIGASHI H., KOTANI T., *The development of evaluation for discomfort glare in LED lighting of indoor work place. The modification of G-classification using luminance distribution of luminous parts*, Proceedings of the CIE Centenary Conference, Paris, France, 2013, p. 657–662.
- [47] YANG Y., LUO M.R., MA S.N., *Assessing glare. Part 2: Modifying Unified Glare Rating for uniform and non-uniform LED luminaires*, Lighting Research & Technology, 2016, 0, p. 1–16.
- [48] NAKAMURA Y., TAKAHASHI R., SASABE K., *Prediction of discomfort glare of a non-uniform light source by use of its luminance image*, Proceedings of the 28th Session of the CIE, Manchester, UK, 2015, p. 400–408.
- [49] SAFDAR M., MUGHAL M.F., YANG Y., LUO M.R., *The human vision model to predict discomfort glare from luminance image*, Proceedings of CIE 2016 “Lighting Quality and Energy Efficiency”, Melbourne, Australia, 2016, p. 125–131.
- [50] SCHEIR G.H., DONNERS M., GEERDINCK L.M., VISSENBERG M.C.J.M., HANSELAER P., RYCKAERT W.R., *Visual discomfort prediction based on receptive fields*, Proceedings of CIE 2016 “Lighting Quality and Energy Efficiency”, Melbourne, Australia, 2016, p. 195–203.
- [51] LOU D., DEMG S., BIAN J., VAN DER BURGT P., *Evaluation of glare from non-uniform luminaires*, Proceedings of the 28th Session of the CIE, Manchester, UK, 2015, p. 1860–1869.
- [52] PN-EN 1838:2013-11 *Zastosowanie oświetlenia – Oświetlenie awaryjne*.
- [53] <http://www.answers.com/topic/lcos-technology>.
- [54] PN-EN 50172:2005 *Systemy awaryjnego oświetlenia ewakuacyjnego*.
- [55] PN-EN 547-3:2000, *Maszyny – Bezpieczeństwo – Wymiary ciała ludzkiego – Dane antropometryczne*.
- [56] BŁASZCZAK U., GILEWSKI M., GRYKO Ł., ZAJĄC A., *Badanie wpływu sposobu zasilania na wybrane parametry optyczne zestawu diod elektroluminescencyjnych*, Przegląd Elektrotechniczny, 2016, R. 92, nr 9.

- [57] ZAJĄC A., BŁASZCZAK U., ZAJKOWSKI M. i in., Sprawozdanie z realizacji III etapu programu wieloletniego *Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy*, finansowanego w latach 2014–2016 finansowanych ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego/Narodowego Centrum Badań i Rozwoju – PW/BWP/WE/1/2014. Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy. Wykonawca projektu: Politechnika Białostocka, 2015.
- [58] HARRISON L.T., *Current Sources & Voltage Refernces*, Elsevier, USA, 2005.
- [59] Hamamatsu Photonics K.K.: Guide to Streak camera, Japan, 2010.
- [60] GRYKO Ł., BŁASZCZAK U., ZAJĄC A., PALKOWSKA A., *Ocena możliwości modelowania temperatury barwowej najbliższej zestawu diod LED dużej mocy*, Przegląd Elektrotechniczny, 2016, 92, nr 9.
- [61] BARBOSA J.L.F., WESLEY P.C., SIMON D., *High Power LED Luminaire Design Optimization*, 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 7–10.06.2016, Florencja.
- [62] PN-ISO 3864-1:2006P *Symbole graficzne. Barwy bezpieczeństwa i znaki bezpieczeństwa*.
- [63] PN-EN ISO 7010:2012 *Symbole graficzne – Barwy bezpieczeństwa i znaki bezpieczeństwa – Zarejestrowane znaki bezpieczeństwa*.
- [64] BŁASZCZAK U., BUDZYŃSKI Ł., ZAJKOWSKI M., *Analiza parametrów kolorymetrycznych wybranych urządzeń z wyświetlaczami LCD/OLED w funkcji kąta obserwacji*, Przegląd Elektrotechniczny, 2015, R. 91, nr 4.
- [65] ZAJKOWSKI M., BUDZYŃSKI Ł., TYNIECKI D., Zgłoszenie patentowe P.420552 pt: *System oświetlenia awaryjnego i ewakuacyjnego E-LCD/OLED o zmiennej treści*.
- [66] BŁASZCZAK U., ZAJKOWSKI M., BUDZYŃSKI Ł., *The analysis of the possibilities of liquid crystal displays application in variable content emergency lighting luminaires*, LUMEN V4, Wyszehrad, 2014.
- [67] TYNIECKI D., BUDZYŃSKI Ł., ZAJKOWSKI M., *Oprawa oświetlenia ewakuacyjnego o modyfikowanej treści*, Przegląd Elektrotechniczny, 2017, R. 93, nr 6.

SELECTED PROBLEMS IN DESIGN AND EVALUATION OF LUMINAIRES WITH SEMICONDUCTOR LIGHT SOURCES

The goal of this section is to present selected issues related to the common use of semiconductor light sources in lighting. Some problems, that originate from current design and metrology engineering, connected with spread of light emitting diodes are elaborated. These problems are the reason for necessary redefining of modern lighting technology. Changes are necessary and clearly visible in recent years.

Semiconductor light sources created the potential for significant energy savings, but also many innovative solutions in lighting. We present exemplary constructions of designed lighting equipment dedicated for general and emergency lighting – luminaire with tunable correlated color temperature, very high color rendering index and anti-glare protection as well as emergency luminaire with variable content.



**Wydawnictwa Politechniki Wrocławskiej
są do nabycia w księgarni
plac Grunwaldzki 13, 50-377 Wrocław
budynek D-1 PWr., tel. 71 320 29 35
Prowadzimy sprzedaż wysyłkową
zamawianie.ksiazek@pwr.edu.pl**

ISBN 978-83-7493-029-1