

Metody detekcji defektów strukturalnych warstw w organicznych ogniwach słonecznych

Streszczenie. Artykuł przedstawia różne sposoby otrzymywania warstw aktywnych w organicznych ogniwach słonecznych oraz metody detekcji ich defektów strukturalnych. Przedstawiono metody optyczne, gdzie etapowo określane są defekty z różną dokładnością, wykorzystujące przetwarzanie obrazów w zakresie widzialnym oraz w zakresie termalnym.

Abstract. The article presents various methods of obtaining active layers in organic solar cells and methods of detecting their structural defects. Optical methods are presented, where defects are determined in stages with different accuracy, using image processing in the visible and thermal range (*Detections methods of structural defects in layers of organic solar cells*)

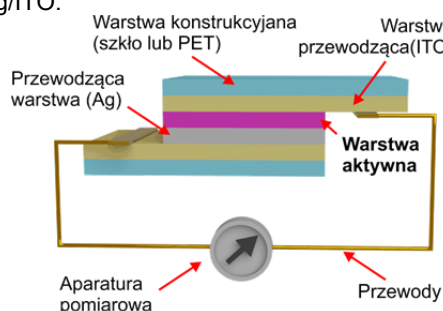
Słowa kluczowe: ogniwa fotowoltaiczne, detekcja defektów, termogramy, przetwarzanie obrazów; metody optyczne.

Keywords: photovoltaic cells, defect detection, thermograms, image processing, optical methods.

Wstęp

W czasach coraz większej świadomości społeczeństwa związanej z ochroną środowiska naturalnego oraz rosnącego zapotrzebowania na energię, coraz więcej energii pochodzi ze źródeł odnawialnych (OZE) [1]. Przykładem OZE są panele fotowoltaiczne, które zbudowane są z nieorganicznych lub organicznych ogniw słonecznych. W wielu ośrodkach naukowych trwają prace badawcze nad znalezieniem wydajnych, odpornych na warunki atmosferyczne, a także prostych i niedrogich ogniw słonecznych. W Wojskowym Instytucie Techniki Inżynieryjnej (WITI) przeprowadzono szereg badań nad wykrywaniem defektów zarówno dla ogniw nieorganicznych – opartych na krzemie poli- i monokrystalicznym, jak i związków organicznych: polimerowych PTB7, małowcząsteczkowych np. pochodna fullerenu PC71BM (jako modelowe) lub nowo zsyntetyzowanych imin np. PV-BLJ-SC11 (i ich mieszanin z PC71BM) [2], a także perowskitowych, czy ogniw barwnikowych [3,4].

Badania przeprowadzano na konstruowanych i wytwarzanych w WITI wielowarstwowych strukturach zastosowanych w ogniwach słonecznych na podłożach sztywnych (szkło), jak i elastycznych (poli(tereftalan fenylenu) PET). Podłoża specjalnie przygotowane do tego celu pokryte były warstwą przewodzącą tlenku indowocynowego (ITO) albo srebra. Pełniły one rolę zarówno konstrukcyjną, jak i swoistych elektrod do których za pomocą przewodów podłączano aparaturę pomiarową tak jak to zostało przedstawione na Rys. 1. Pomiędzy tymi warstwami w odpowiednich obszarach nakładano warstwę aktywną oraz dodatkową warstwę przewodzącą Ag. Przykładowe architektury badanych układów można przedstawić w następującej notacji: ITO/PTB7/Ag/ITO; ITO/PC71BM/Ag/ITO; ITO/PV-BLJ-SC11/Ag/ITO; ITO/PTB7:PV-BLJ-SC11/Ag/ITO; ITO/PC71BM:PV-BLJ-SC11/Ag/ITO.



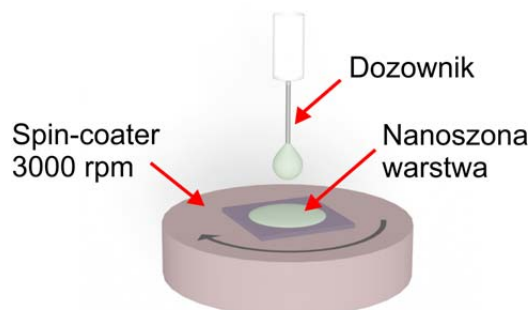
Rys. 1. Architektura ogniwa słonecznego

Jednym z problemów towarzyszącym wytwarzaniu organicznych ogniw słonecznych są defekty strukturalne poszczególnych warstw, co skutkuje obniżeniem wydajności ogniwa lub jego niewłaściwą pracą np. wzrostem temperatury spowodowanym dużymi oporami wewnętrznymi przy stosunkowo wysokim natężeniu prądu. Stąd potrzeba dokonywania detekcji defektów z uwzględnieniem sposobu nanoszenia warstwy aktywnej.

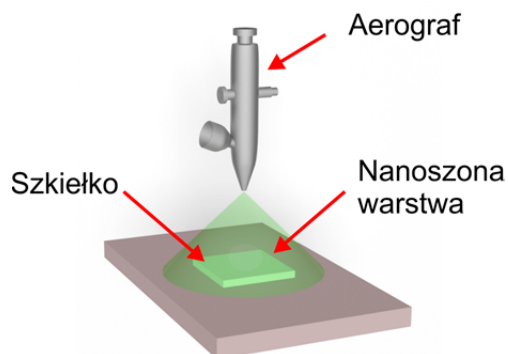
Warstwa aktywna – nanoszenie

Warstwy są nanoszone różnymi metodami [5]:

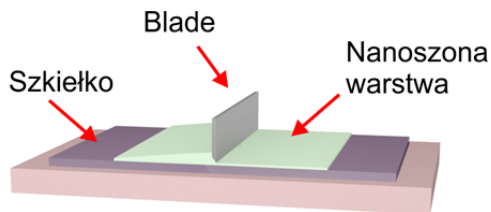
- nanoszenie wirowe tzw. *spin-coating* – Rys. 2,
- nanoszenie natryskowe tzw. *spray-coating* – Rys. 3,
- nanoszenie metodą listwy rozwijającej tzw. *doctor blade* – Rys. 4.



Rys. 2. Zasada techniki *spin-coatingu*



Rys. 3. Zasada techniki *spray-coatingu*



Rys. 4. Zasada techniki *doctor blade*

Detekcja defektów

Nanoszone warstwy wymagają oceny jakości, głównie w zakresie jej ciągłości i jednorodności. Ocenę przeprowadza się trzema różnymi metodami:

1. Oględziny okiem nieuzbrojonym

To metoda najmniej dokładna i może służyć jedynie do wstępnej oceny jakości warstw. Spowodowane jest to przede wszystkim dużą przeziernością poszczególnych warstw oraz ich niewielką grubością jak można zaobserwować na Rys. 5.

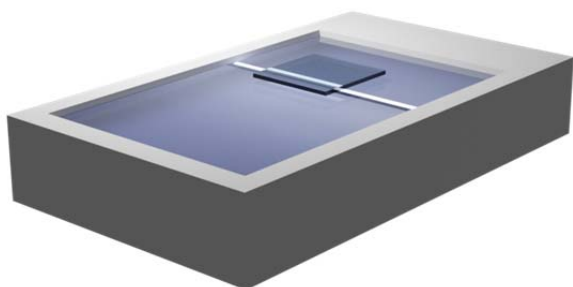


Rys. 5. Próbkę z naniesioną i wytrawioną lokalnie warstwą ITO oraz PEDOT: PSS

2. Analiza obrazowań w świetle widzialnym

Metoda obrazowań w świetle widzialnym zapewnia zdecydowanie lepszą ocenę jakości warstw w zakresie ciągłości i jednorodności.

Do tego celu wykorzystywano obrazowania próbek wykonane skanerem płaskim (Epson V330, Japonia) o rozdzielczości optycznej nie mniejszej niż 1200 dpi, co zostało pokazane schematycznie na Rys. 6.

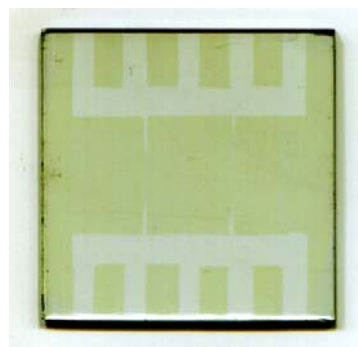


Rys. 6. Wykonywanie zobrazowania z wykorzystaniem skanera płaskiego

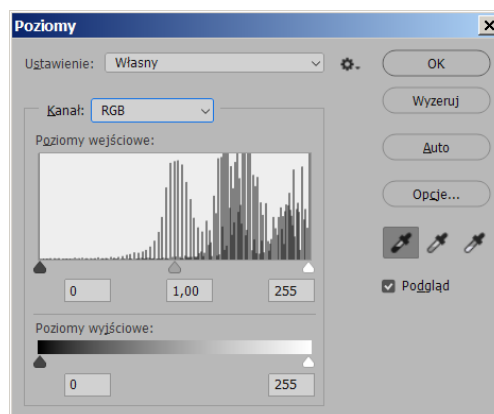
Ze względu na występowanie cienia pochodzącego od szklanej warstwy próbki, skanowana próbka była ułożona równolegle do głowicy skanującej skanera, tak aby występujący cień nie nachodził na obszar próbki poddawanej sprawdzaniu. Zobrazowania były zapisane do bezstratnego formatu TIFF w rozdzielczości 8 bitów na każdy z kanałów RGB (*Red Green Blue*).

W dalszej kolejności skanowane obrazy poddawano obróbce graficznej, która zawierała:

- normalizację zakresu histogramu wykonanego dla wszystkich kanałów barwnych RGB przedstawioną na rys. 7;
- selekcję kanału barwnego; gdzie do dalszej analizy wybierano te kanały barwne na których najlepiej wyeksponowane były defekty ciągłości i jednorodności. W przedstawianym przykładzie wybrano kanał Blue, jak zademonstrowano na Rys. 8;
- przetworzenie obrazu wielokanałowego do obrazu w odcieniach szarości przedstawione na Rys. 9;
- zastosowanie filtracji wyostrającej zobrazowane na rys. 10.

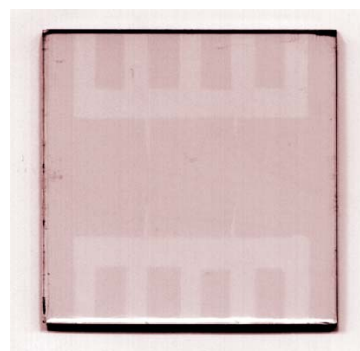


a)

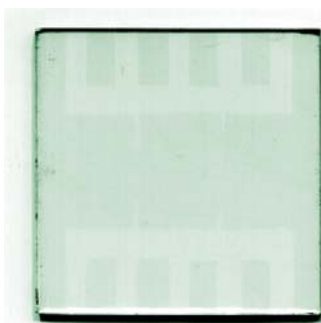


b)

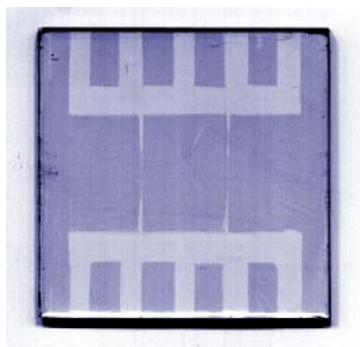
Rys. 7. Zeskanowany obraz po normalizacji histogramu a) oraz okno programu graficznego b)



Red

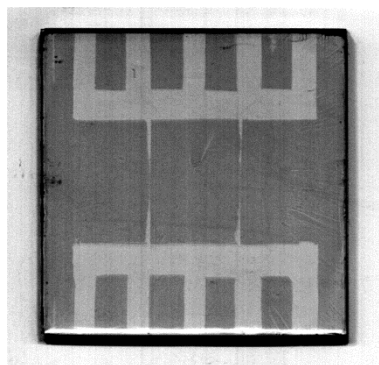


Green

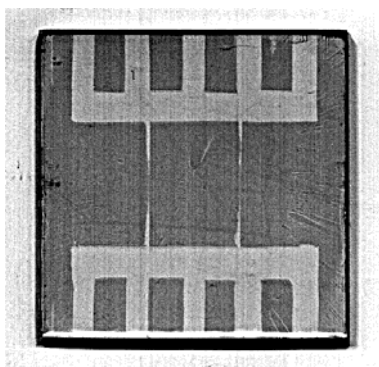


Blue

Rys. 8. Kanały barwne zobrazowania: Red, Green, Blue

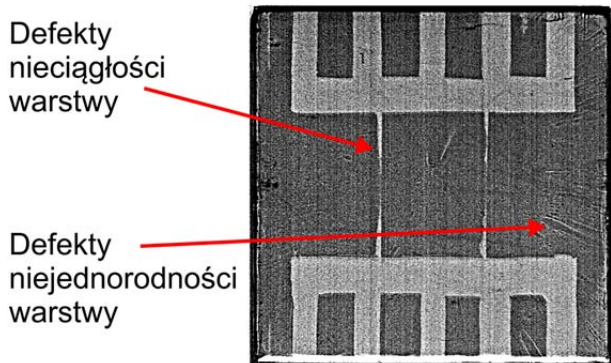


Rys. 9. Kanał Blue przetworzony do skali szarości



Rys. 10. Zobrazowanie po zastosowaniu filtra wyostrajającego

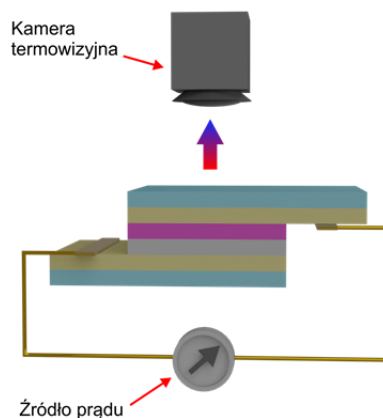
Wyeksponowane defekty warstw zeskanowanej próbki przedstawiono na rys. 11.



Rys. 11. Zobrazowanie z wyeksponowanymi defektami warstw

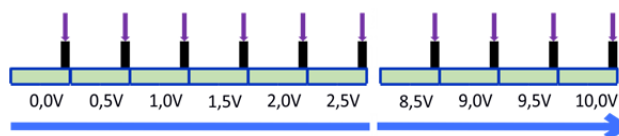
3. Analiza obrazowań termalnych [5]

Metoda obrazowań termalnych była przeprowadzana w trakcie badań z wykorzystaniem potencjostatu (PGStat Autolab M101, Metrohm, Nederland) i kamery termalnej (VIGOCam V50, VIGO System SA, Polska) zgodnie ze schematem przedstawionym na Rys. 12.

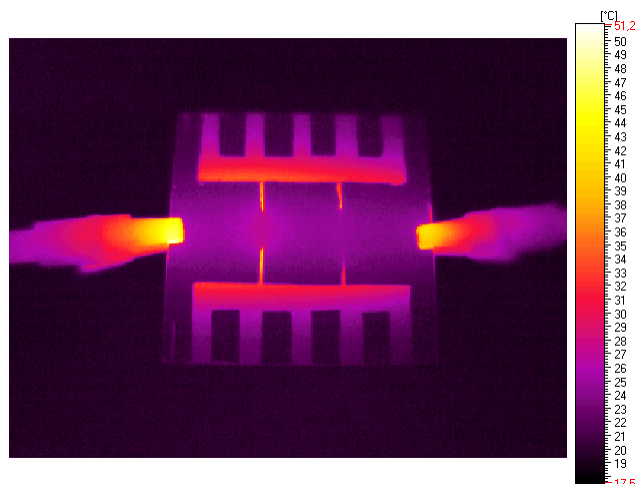


Rys. 12. Schemat stanowiska pomiarowego do badań z użyciem kamery termowizyjnej i potencjostatu

Do badanej próbki przykładano napięcie w zakresie od 0,5 V do 10 V z krokiem 0,5 V. Okresy przyłożenia każdej wartości napięcia wynosiły 190 s. Pod koniec każdego okresu wykonywano zobrazowanie termalne, co przedstawiono schematycznie na Rys. 13. Poszczególne warstwy próbki cechowały się różnym przewodnictwem elektrycznym oraz różnym przewodnictwem ciepła, co powodowało różnice w nagrzewaniu się warstw po przyłożeniu napięcia. W związku z tym defekty warstwy można było zaobserwować na termogramach. Przykładowy termogram przedstawiono na Rys. 14.



Rys. 13. Schemat kroków pomiarowych w trakcie wykonywania termogramów



Rys. 14. Zobrazowanie termalne próbki z uwidocznionymi warstwami i defektami

W trakcie badań przede wszystkim wyznaczano charakterystyki prądowe i wynikające z nich rezystancję, konduktancję, opór cieplny, czy ciepło Joule'a. Natomiast dzięki sprzężeniu z obrazowaniem termalnym, otrzymywano informację na temat temperatury i jej rozkładu na powierzchni próbki, a w konsekwencji także wizualizację gęstości ładunków w zależności od przykładanego napięcia i defektów warstwy aktywnej.

Wnioski

Zaproponowano w artykule trzystopniową metodę weryfikacji poprawności wykonania warstwy organicznej

oraz detekcji defektów strukturalnych w organicznych ogniwach słonecznych. Pożądane do stosowania w organicznych ogniwach słonecznych warstwy o dużych powierzchniach wymagają stworzenia spójnego protokołu postępowania z nimi w celu detekcji problemów jakościowych. Każda z metod wytwarzania warstw ma swoje wady i zalety. Niestety dokładniejsza metoda służąca w skali laboratoryjnej nie może być zawsze stosowana do produkcji wielkopowierzchniowej (np. spin-coating), dlatego istotnym jest szybkie i łatwe identyfikowanie nieciągłości warstw.

Przedstawione metody detekcji defektów warstw opartych o materiały organiczne umożliwiają lepsze poznanie ich struktury, pod kątem możliwych rodzajów defektów, i warunków pracy, co może prowadzić do konstruowania wydajniejszych, trwalszych ogniw słonecznych.

Podziękowania dla Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR) za wsparcie finansowe projektu „Wydajne i lekkie układy zasilające złożone z ogniwa słonecznego i baterii litowo-jonowej oraz ogniwa słonecznego i superkondensatora przeznaczone do zastosowań specjalnych” otrzymane w ramach Strategicznego programu badań naukowych i prac rozwojowych „Nowoczesne technologie materiałowe”. (Nr TECHMATSTRATEG1/347431/14/ NCBR/2018).

Podziękowania dla mgr B. Jewłoszewicz za współudział w wykonaniu badań zobrazowania termalnego.

Autorzy: mgr inż. Wojciech PRZYBYŁ, Wojskowy Instytut Techniki Inżynierskiej im. profesora Józefa Kosackiego, ul. Obornicka 136, 50-961 Wrocław, e-mail: przybyl@witi.wroc.pl; mgr inż. Ireneusz PLEBANKIEWICZ, Wojskowy Instytut Techniki Inżynierskiej im. profesora Józefa Kosackiego, ul. Obornicka 136, 50-961 Wrocław, E-mail: plebankiewicz@witi.wroc.pl, dr Krzysztof A. BOGDANOWICZ, Wojskowy Instytut Techniki Inżynierskiej im. profesora Józefa Kosackiego, ul. Obornicka 136, 50-961 Wrocław, e-mail: bogdanowicz@witi.wroc.pl, prof. dr hab. Agnieszka IWAN, Wojskowy Instytut Techniki Inżynierskiej im. profesora Józefa Kosackiego, ul. Obornicka 136, 50-961 Wrocław, E-mail: iwan@witi.wroc.pl;

LITERATURA

- [1] Jayawardena K.D.G.I., Rozanski L.J., Mills C. A., Belatis M. J., Nismy N.A., Silva S.R.P., 'Inorganics-in-Organics': recent developments and outlook for 4G polymer solar cells, *Nanoscale* 5, 8411 (2013).
- [2] Petrus M.L., Bouwer R.K.M., Lafont U., Athanasopoulos S., Greenham N.C., Dingemans T.J., Small-molecule azomethines: organic photovoltaics via Schiff base condensation chemistry, *Journal of Materials Chemistry A* 2, 9474 (2014).
- [3] Lin Y., Zhan X., Oligomer Molecules for Efficient Organic Photovoltaics, *Accounts of Chem. Research* 49, 175 (2016).
- [4] Bogdanowicz, K.A.; Augustowski, D.; Dziedzic, J.; Kwaśnicki, P.; Malej, W.; Iwan, A., Preparation and characterization of novel polymer-based gel electrolyte for dye-sensitized solar cells based on poly(vinylidene fluoride-co-hexafluoropropylene) and poly(acrylonitrile-co-butadiene) or poly(dimethylsiloxane) bis(3-aminopropyl) copolymers, *Materials* 13 (2020) 2721.
- [5] Różycka A., Bogdanowicz K.A., Górka N., Rysz J., Marzec M., Iwan A., Pich R., Januszko A., Influence of TiO₂ Nanoparticles on Liquid Crystalline, Structural and Electrochemical Properties of (8Z)-N-(4-((Z)-4-pentylphenylimino)methyl)benzylidene)-4-pentylbenzenamine, *Materials* 12, 1097 (2019).
- [6] Przybył W., Bogdanowicz K.A., Jewłoszewicz B., Dylong A., Dysz K., Iwan A., Januszko A., IR thermographic camera as useful and smart tool to analyse defects in organic solar cells, *Photonics Letters of Poland*, Vol. 12 (2), 25-27 (2020)
- [7] Bogdanowicz K. A., Iwan A., Review on thermoelectrical properties of selected imines in neat and multicomponent layers towards organic opto-electronics and photovoltaics, *Opto-Electronics Review* 29 (2021) 201-212
- [8] Iwan A., Plebankiewicz I., Maleczek S., Przybył W., Bogdanowicz K. A., Innowacyjne ładowarki słoneczne – rozwiązania WITI, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2022, 1(1), pp. 155–157