

doi:10.15199/48.2015.09.10

Wpływ temperatury na charakterystyki fotoogniwa polimerowego na bazie P3HT:PCBM

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań doświadczalnych i symulacyjnych fotoogniwa polimerowego o architekturze ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al wykonanego w Instytucie Elektrotechniki we Wrocławiu. Przeprowadzono pomiary i obliczenia ilustrujące wpływ temperatury na charakterystyki oświetlonego i nieoświetlonego fotoogniwa polimerowego. Wykazano, że opracowany uprzednio przez autorów model fotoogniwa krzemowego poprawnie opisuje także charakterystyki fotoogniw polimerowych.

Abstract. This paper presents some results of measurements and calculations of a polymer solar cell with the ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al architecture, elaborated in the Electrotechnical Institute in Wrocław. Measurements and calculations illustrating an influence of temperature on light and dark characteristics of a polymer solar cell are performed. It was shown, that the computer model of silicon solar cells, previously elaborated by the authors, correctly describes characteristics of polymer solar cells. (Influence of temperature on characteristics of a polymer solar cell based on P3HT:PCBM).

Słowa kluczowe: fotoogniwa polimerowe, zjawiska cieplne, modelowanie, P3HT:PCBM.

Keywords: polymer solar cells, thermal phenomena, modelling, P3HT:PCBM.

Wprowadzenie

W ostatnich latach obserwuje się dynamiczny rozwój fotowoltaiki opartej na fotoogniwach krzemowych [1]. Fotoogniwa takie są wykorzystywane zarówno w autonomicznych systemach fotowoltaicznych, np. domowych, jak i w elektrowniach solarnych. Sprawność fotoogniw produkowanych w latach 40. ubiegłego wieku nie przekraczała 1%, podczas gdy już w 2009 wzrosła ona do 25% [2]. Zgodnie jednak z teorią Shockley-Queissera, maksymalna sprawność prostego krzemowego systemu fotowoltaicznego może osiągnąć jedynie 31% [3]. Dodatkowo, sprawność ta jest ograniczana przez straty energii wynikające z rezystancji połączeń poszczególnych fotoogniw zawartych w panelach fotowoltaicznych [4], pochłanianie energii promieniowania słonecznego przez szkło zabezpieczające powierzchnię paneli fotowoltaicznych, zmiany temperatury otoczenia oraz zjawisko samonagrzewania [2, 5]. Dlatego wciąż trwają prace mające na celu podniesienie efektywności klasycznych systemów fotowoltaicznych [2, 6, 7, 8].

Duża podatność fotoogniw krzemowych na złamania wymusza stosowanie konstrukcji nośnej paneli fotowoltaicznych, która istotnie wpływa na koszt wytworzenia tych elementów instalacji fotowoltaicznej. Konieczność stosowania zabezpieczającej warstwy szkła na powierzchni panelu fotowoltaicznego, powoduje wzrost kosztów produkcji i masy tego panelu.

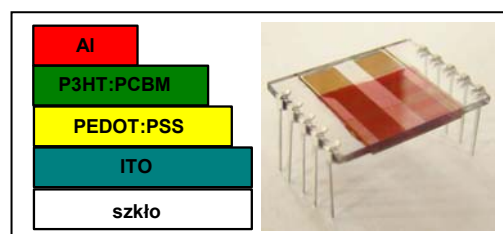
Klasyczne, krzemowe fotoogniwa są nieprzezroczyste, a ich niska sprawność energetyczna powoduje, że uzyskanie pożądanej mocy na ich wyjściu wymaga pokrycia panelami fotowoltaicznymi dużych powierzchni [9, 10]. W miastach wykorzystuje się w tym celu dachy budynków, których powierzchnia jest jednak niedostateczna do zaspokojenia potrzeb energetycznych. Z drugiej strony widoczny jest rozwój elektroniki polimerowej [11], którego elementem jest rozwój fotoogniw organicznych [12].

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań doświadczalnych i symulacyjnych fotoogniwa polimerowego o architekturze ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al ilustrujące wpływ temperatury na charakterystyki prądowo-napięciowe ogniwa.

Badane fotoogniwa

W Instytucie Elektrotechniki we Wrocławiu skonstruowano fotoogniwo polimerowe na podłożu

szklanym o architekturze ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al [13]. Jako akceptor zastosowano ester metylowy kwasu [6,6]-fenylo-C₆₁-masłowego (PCBM), zaś jako donor poli(3-heksylotiofen) (P3HT). Na pokryte warstwą ITO (tlenek indowo-cynowy) podłożu szklane naniesiono warstwę PEDOT:PSS (poli(3,4-etylenodioksytiofen) i polistyren sulfonowany) oraz następnie warstwę aktywną zawierającą mieszaninę P3HT:PCBM. Obie warstwy, tj. PEDOT:PSS oraz P3HT:PCBM, naniesione zostały przy użyciu powlekania obrotowego. W kolejnym etapie naparowano elektrodę aluminiową i zabezpieczono ogniwo żywicą epoksydową. Schematycznie budowę polimerowego ogniwa słonecznego objętościowego skonstruowanego w IEL Wrocław przedstawiono na rysunku 1.



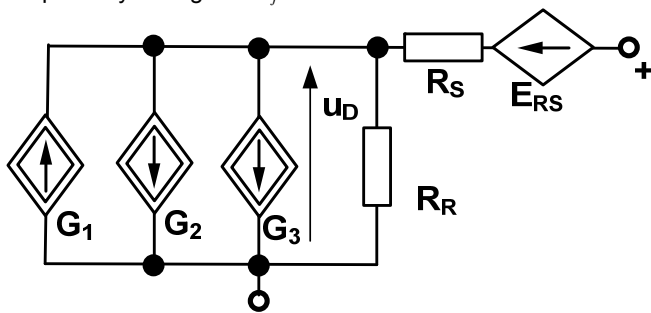
Rys. 1. Architektura polimerowego ogniwa słonecznego objętościowego wraz ze zdjęciem ogniwa

Skonstruowano ogniwo (rys. 1) o wymiarach pojedynczego piksela 1,5 mm × 3 mm. Na jednym ogniwie do badań znajduje się 6 pikseli. Charakterystyki fotowoltaiczne (rys. 1) zostały zmierzone w Instytucie Elektrotechniki we Wrocławiu na urządzeniu Solar Symulator Model SS100AAA z lampą ksenonową o mocy 500 W i filtrem AM 1.5G. Do urządzenia dołączona była przystawka do pomiarów firmy Ossila, która umożliwia pomiar prototypowych ogniw słonecznych polimerowych o minimalnej powierzchni 4,5 mm². Dla otrzymanego polimerowego ogniwa słonecznego wyznaczono wartości sprawności (PCE = 2,61%), współczynnika wypełnienia (FF = 53%), napięcia obwodu otwartego ($V_{oc} = 0,659$ V) i gęstości prądu zwarcia ogniwa ($J_{sc} = 7,39$ mA/cm²). Skonstruowane fotoogniwo polimerowe zostało powtórnie zbadane w Akademii Morskiej w Gdyni po upływie 10 dni od skonstruowania ogniwa.

Model fotoogniwa polimerowego

Reprezentację obwodową modelu fotoogniwa polimerowego, zaproponowanego w pracy [14], przedstawiono na rysunku 2. Model ten uwzględnia zjawisko fotoelektryczne oraz wpływ temperatury na charakterystyki fotoogniwa.

W modelu tym źródło prądowe G_1 reprezentuje prąd fotoelektryczny, którego wartość zależy od gęstości mocy promieniowania świetlnego P , sprawności konwersji fotowoltaicznej η , powierzchni aktywnej części fotoogniwa S , temperaturowego współczynnika zmian fotoprądu α_T oraz temperatury fotoogniwa T_j .



Rys. 2. Reprezentacja obwodowa modelu fotoogniwa polimerowego

Z kolei, sterowane źródło prądowe G_2 reprezentuje składową dyfuzyjną prądu złącza p-n opisaną klasycznym modelem Shockley'a. W równaniu opisującym wartość tego prądu występują: parametr gęstości prądu nasycenia (J_0), współczynnik emisji złącza (n), napięcia odpowiadającego szerokości przerwy energetycznej (U_{go}).

Sterowane źródło prądowe G_3 reprezentuje składową generacyjno-rekombinacyjną prądu złącza p-n. W opisie tego prądu występują: parametr gęstości prądu nasycenia składowej generacyjno-rekombinacyjnej (J_{02}) oraz współczynnik emisji tej składowej (n_1).

Rezystor R_R modeluje upływność złącza, zaś R_S reprezentuje rezystancję szeregową fotoogniwa w temperaturze odniesienia T_0 . Sterowane źródło napięciowe E_{RS} modeluje wpływ temperatury na rezystancję szeregową fotoogniwa za pomocą zależności liniowej, w której α_{RS} oznacza temperaturowy współczynnik zmian rezystancji szeregowej.

Prezentowany model opisany jest zatem przy wykorzystaniu 12 parametrów. Równania opisujące rozważany model oraz sposób wyznaczania wartości jego parametrów przedstawiono w pracach [14, 15].

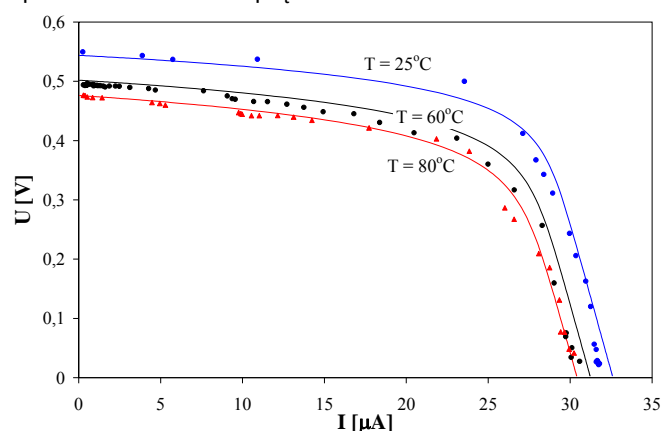
Wyniki obliczeń i pomiarów

Wykorzystując stanowisko do pomiaru charakterystyk fotoogniw, opisane w pracy [15], zmierzono charakterystyki I-U oświetlonego i nieoświetlonego fotoogniwa polimerowego z warstwą aktywną P3HT:PCBM. Charakterystyki prądowo-napięciowe obliczono również za pomocą modelu przedstawionego na rysunku 2. Na rysunkach 3 – 4 przedstawiono obliczone (linie) i zmierzone (punkty) charakterystyki I-U fotoogniwa z warstwą aktywną P3HT:PCBM w szerokim zakresie zmian temperatury (od 25 do 80°C). Wartości parametrów modelu wykorzystane w

obliczeniach przedstawiono w tabeli 1. W czasie badań połączono równolegle 4 piksele obecne w badanym fotoogniwie polimerowym.

Porównując wartości parametrów fotoogniwa zawarte w tabeli 1 z wartościami parametrów ogniwa krzemowego z pracy [14] można stwierdzić, że rozważane fotoogniwo polimerowe cechuje się mniejszą wartością napięcia U_{go} odpowiadającego szerokości przerwy energetycznej oraz dziesięciokrotnie większą rezystancją R_R , ujemną wartością temperaturowego współczynnika zmian fotoprądu α_T oraz osmiokrotnie mniejszą sprawnością przetwarzania energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną.

Przedstawione na rysunku 3 charakterystyki I-U uzyskano przy oświetlaniu badanego fotoogniwa polimerowego za pomocą klasycznych żarówek. Gęstość mocy promieniowania na powierzchni fotoogniwa w czasie pomiarów wynosiła 80,8 W/m². Jak można zauważyć, wyniki obliczeń zadawalająco odzwierciedlają wyniki pomiarów. Wzrost temperatury powoduje spadek wartości napięcia na fotoogniwie, jednak, w odróżnieniu od fotoogniw krzemowych, wzrost temperatury skutkuje spadkiem wartości fotoprądu.



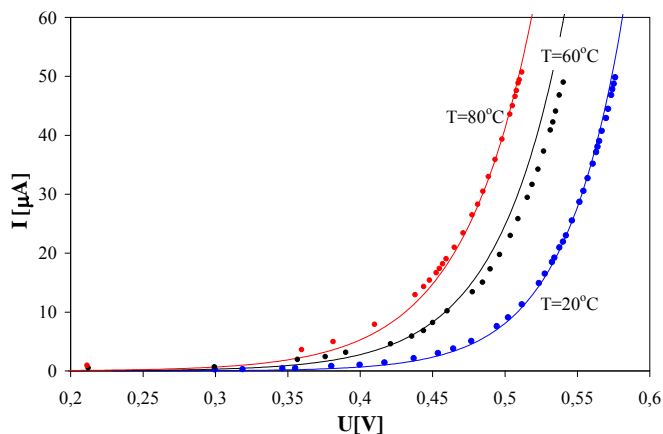
Rys. 3. Zmierzone i obliczone charakterystyki I-U oświetlonego fotoogniwa polimerowego na bazie P3HT:PCBM w szerokim zakresie zmian temperatury

Uzyskana wartość maksymalna fotoprądu nieznacznie przekracza 30 μA. Wartość ta jest tak mała ze względu na małą wartość powierzchni czynnej fotoogniwa. Warto zwrócić uwagę na duże nachylenie rozważanej charakterystyki w zakresie wysokich wartości prądu fotoogniwa wynikające ze stosunkowo dużej upływności badanego elementu.

Przedstawione na rysunku 4 charakterystyki I-U dla nieoświetlonego fotoogniwa polimerowego mają kształt identyczny z charakterystykami złącza p-n. Warto zauważyć, że pomimo małej wartości prądu przewodzenia złącza, dochodzącej do zaledwie 50 μA, temperaturowy współczynnik zmian napięcia przewodzenia jest mniejszy niż dla złącza krzemowego i wynosi zaledwie -1 mV/K, co jest wartością dwukrotnie mniejszą od wartości tego parametru dla fotoogniw krzemowych.

Tabela 1. Wartości parametrów modelu fotoogniwa polimerowego na bazie P3HT:PCBM

Parametr	S [m ²]	η [-]	T_0 [K]	α_T [1/K]	J_0 [A/m ²]	n [-]	U_{go} [V]	n_1 [-]	R_S [mΩ]	α_{RS} [1/K]	R_R [kΩ]
Wartość	18×10^{-6}	0,0149	300	$-1,2 \times 10^{-3}$	778,5	1,6	0,8	3,2	1	0,003	100



Rys. 4. Zmierzone i obliczone charakterystyki nieoświetlonego fotoogniwa polimerowego w szerokim zakresie zmian temperatury

Z przeprowadzonych badań wynika, iż na parametry elektryczne polimerowego ogniwa słonecznego z warstwą aktywną P3HT:PCBM duży wpływ ma temperatura oraz tlen z powietrza, które wpływają na degradację polimeru w ogniwie.

Podsumowanie

W pracy przedstawiono wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych wpływu temperatury na charakterystyki I-U fotoogniwa polimerowego o architekturze ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al skonstruowanego w Instytucie Elektrotechniki we Wrocławiu. Zmierzono oraz obliczono charakterystyki I-U statyczne fotoogniwa polimerowego pracującego w szerokim zakresie zmian temperatury od 25 do 80°C.

Wyniki pomiarów i obliczeń potwierdziły, że temperatura w widoczny sposób wpływa na charakterystyki I-U rozważanego fotoogniwa polimerowego, a kształt tych charakterystyk jest zbliżony do kształtu charakterystyk klasycznych fotoogniw krzemowych. Na charakterystykach prądowo-napięciowych wykonanych dla fotoogniwa nieoświetlanego zauważono mniejszą wartość współczynnika temperaturowych zmian napięcia przewodzenia niż dla ogniw krzemowych. Z kolei na charakterystykach I-U dla oświetlonego fotoogniwa polimerowego widać, że w przeciwieństwie do ogniw krzemowych, fotoprąd maleje przy wzroście temperatury.

Wykazano również, że model fotoogniwa krzemowego może z powodzeniem być stosowany do opisu właściwości fotoogniwa polimerowego. Porównanie wartości parametrów zaproponowanego modelu dla obu rodzajów fotoogniw wskazuje, że sprawność konwersji energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną jest około ośmiokrotnie mniejsza w przypadku fotoogniwa polimerowego. Planowane są dalsze badania dla fotoogniw polimerowych zawierających inne niż P3HT polimery.

Agnieszka Iwan składa podziękowania Narodowemu Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR) za wsparcie finansowe projektu pt.: „Nowe polimerowe ogniwa fotowoltaiczne: Badanie wpływu budowy polimeru, architektury ogniwa oraz rodzaju domieszki na sprawność polimerowych ogniw słonecznych opartych na poliazometinach i politiofenach” (POF) otrzymane w ramach I konkursu NCBiR „Program Badań Stosowanych” (nr PBS1/A5/27/2012).

LITERATURA

- [1] Mulvanet D., Solar's Green Dilemma, *IEEE Spectrum*, No. 9, 2014, 26-29
- [2] Singh R., Alapatt G.F., Lakhtakia A., Making Solar Cells a Reality in Every Home: Opportunities and Challenges for Photovoltaic Device Design, *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, Vol. 1, No.6, 2013, 129-144
- [3] Shockley W., Queisser H.J., Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells, *J. Appl. Phys.*, Vol. 32, No. 3, 1961, 510-519
- [4] Górecki K., Krac E., Zarębski J., Photo-electro-thermal characteristics of photovoltaic panels, 2nd International Congress on Energy Efficiency and Energy Related Materials, ENEFM 2014, Oludeniz, Book of Abstracts, 116
- [5] Górecki K., Górecki P., Elektrotermiczny stałoprądowy model fotoogniwa, *Elektronika* nr 12, 2013, 62-64
- [6] Klugmann-Radziemska E., Fotowoltaika w teorii i praktyce, Wydawnictwo BTC, Legionowo, 2010
- [7] Panek P., Fotowoltaika Polska 2011, *Elektronika*, nr 6, 2011, 69-94
- [8] Rashid M.H., Power Electronic Handbook, Academic Press, Elsevier, 2007
- [9] Montgomery J., 100GW of solar PV; now installed in the world today, <http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2013/02/100-gw-of-solar-pv-now-installed-in-the-world-today>.
- [10] Villalva M.G., Gazoli J.R., Filho E.R., Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 24, No. 5, 2009, 1198-1208.
- [11] Pron A., Rannou P., Processible conjugated polymers: from organic semiconductors to organic metals and superconductors, *Progress in Polymer Science*, Vol. 27, 2002, 135-190
- [12] Peters C.H., Sachs-Quintana I.T., Kastrop J.P., Beaupr'e S., Leclerc M., McGehee M.D., High efficiency polymer solar cells with long operating lifetimes, *Adv. Energy Mater.*, Vol. 1, No. 4, 2011, 491-494
- [13] Boharewicz B., Iwan A., Hreniak A., Tazbir I., Parafiniuk K., Polimerowe ogniwa fotowoltaiczne: konstrukcja i charakterystyka, *XIII Krajowa Konferencja Elektroniki*, Dąbrowa, 2014, 361-365
- [14] Górecki K., Górecki P., Paduch K., Modelling solar cells with thermal phenomena taken into account, *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 494, 2014, 012007, doi:10.1088/1742-6596/494/1/012007
- [15] Górecki K., Krac E., Badanie wpływu temperatury na charakterystyki fotoogniw, *Elektronika*, Nr 9, 2014, 95-98

Autorzy: dr hab. inż. Krzysztof Górecki, prof. AMG, Akademia Morska w Gdyni, Wydział Elektryczny, ul. Morska 83, 81-225 Gdynia, E-mail: gorecki@am.gdynia.pl; mgr inż. Ewa Krac, Akademia Morska w Gdyni, Wydział Elektryczny, ul. Morska 83, 81-225 Gdynia, E-mail: e.krac@we.am.gdynia.pl; dr hab. inż. Agnieszka Iwan, prof. IEL, Instytut Elektrotechniki, Oddział Technologii i Materiałoznawstwa Elektrotechnicznego, ul. M. Skłodowskiej-Curie 55/61, 50-369 Wrocław, E-mail: a.iwan@iel.wroc.pl; mgr inż. Bartosz Boharewicz, Instytut Elektrotechniki, Oddział Technologii i Materiałoznawstwa Elektrotechnicznego, ul. M. Skłodowskiej-Curie 55/61, 50-369 Wrocław, E-mail: b.boharewicz@iel.wroc.pl; mgr inż. Igor Tazbir, Instytut Elektrotechniki, Oddział Technologii i Materiałoznawstwa Elektrotechnicznego, ul. M. Skłodowskiej-Curie 55/61, 50-369 Wrocław.