

**LABORATORIA
APARATURA
BADANIA**

ISSN-1427-5619

2 / 2018

DWUMIĘSIĘCZNIK

Stal - mikrostruktura stali trenowanej z wykorzystaniem czynnika Barkera obserwowana w świetle spolaryzowanym. Zdjęcie przedstawia zniekształconą mikrostrukturę z bliskim kątem zjawiającym się wewnątrz, za ren. Politechniki Śląskiej, Instytut Materiałów Inżynierskich, Łódź

**Badania
własności optycznych
cienkich warstw**

**Zalety prowadzenia
projektów w laboratorium**



Badania własności elektrycznych ogniw fotowoltaicznych

Aleksandra Drygała¹⁾, Marek Szindler¹⁾, Magdalena Szindler¹⁾, Leszek A. Dobrzański²⁾

Przemysł związany z energią fotowoltaiczną jest jedną z najszybciej rozwijających się gałęzi przemysłu. Dynamika jego wzrostu porównywana jest do dynamiki wzrostu przemysłu mikroelektronicznego w początkowym okresie jego rozwoju. Opracowywane są liczne projekty, dotyczące strategii rozwoju fotowoltaiki, gdzie podstawowym celem jest wzrost wydajności ogniw fotowoltaicznych oraz spadek cen ich produkcji, instalacji i eksploatacji. Postęp jest możliwy przez doskonalenie złącz, kontaktów i cech geometrycznych ogniw, metod obróbki ich powierzchni oraz stosowanie nowych materiałów inżynierskich o unikatowych własnościach.

Pierwsze wydajne (6%) ogniwa słoneczne z krzemu krystalicznego wykonali Chapin, Fuller i Pearson z Bell Laboratories w roku 1953, przez dyfuzję boru do krzemu typu n. Pięć lat później Maldenkorn i współpracownicy z United States Army Electronics Research and Development Laboratories w Belmar, New Jersey otrzymali ogniwa typu n-p. Latem 1960 r. stwierdzono w RCA Laboratories, że te ogniwa są znacznie bardziej odporne na działanie promieniowania kosmicznego niż ogniwa p-n, co spowodowało niezwykle intensywny rozwój badań ogniw krzemowych, celem ich zastosowania jako źródeł energii w statkach kosmicznych. W latach siedemdziesiątych, kiedy zastrzył się kryzys energetyczny, zaczęto myśleć o zastosowaniu ogniw słonecznych również do celów ziemskich, co sprawiło, że prace związane z doskonaleniem technologii krzemowych ogniw fotowoltaicznych stały się jednym z najbardziej atrak-

cyjnych kierunków badań. W okresie minionych czterdziestu lat, krystaliczne krzemowe ogniwa typu n-p zostały wielokrotnie udoskonalone i zmieniła się ich konstrukcja, która aktualnie składa się z czterech podstawowych elementów (rys. 1 i 2):

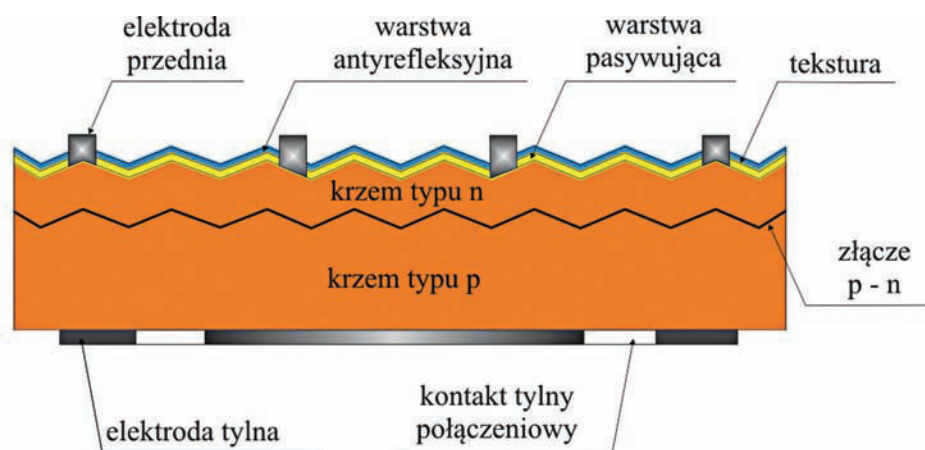
- płytki krzemowej (z wytworzonym złączem p-n),
- kontaktów elektrycznych (elektroda przednia i tylna),
- warstwy pasywującej,
- warstwy antyrefleksyjnej.

Zasada działania krzemowego ogniwa fotowoltaicznego

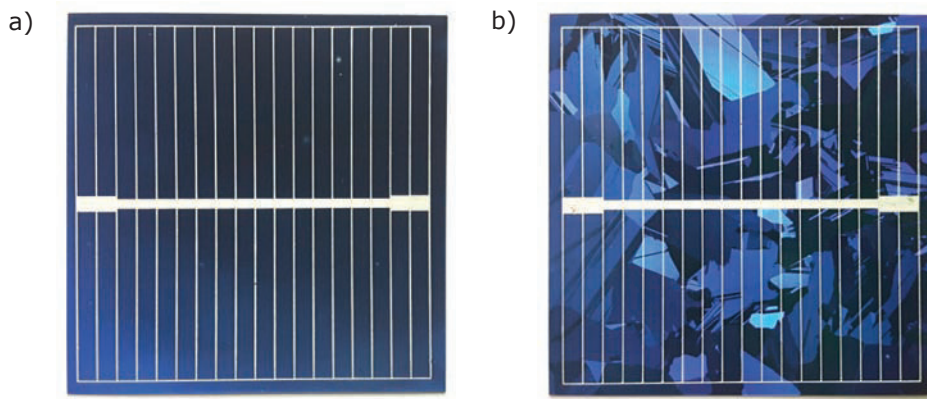
opiera się na efekcie fotowoltaicznym. Ogniwo słoneczne jest elementem półprzewodnikowym, w którym zaabsorbowany foton generuje parę nośników ładunku dziura - elektron. Nośniki te zostają rozdzielone pod wpływem pola elektrycznego. Elektron przechodzi z obszaru p do obszaru n, pozostawiając po sobie dziurę, która zostaje obsadzona przez kolejny elektron, co sprawia wrażenie, że dziura wędruje z obszaru n do obszaru p. Dzięki temu obie strefy nie są neutralne elektrycznie,

a to powoduje powstanie różnicy potencjałów, nazywanej napięciem fotowoltaicznym, w wyniku czego następuje przepływ prądu elektrycznego (rys. 3).

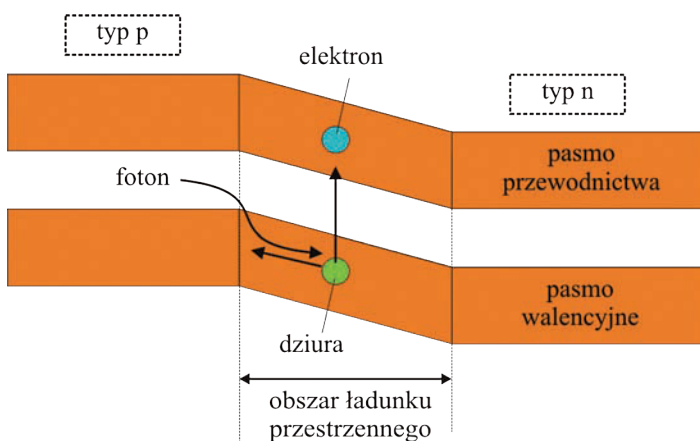
Krzemowe ogniwa fotowoltaiczne zbudowane na bazie złącza p-n mają zbliżone własności elektryczne do diody krzemowej. Dioda krzemowa przepuszcza prąd w kierunku przewodzenia. Na rys. 4. pokazano charakterystykę diody krzemowej w obszarze przewodzenia i w obszarze zaporowym.



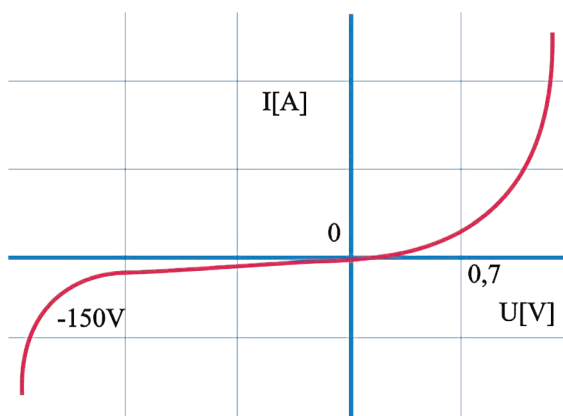
Rys. 1. Schemat krzemowego ogniwa fotowoltaicznego



Rys. 2. Krzemowe ogniwo fotowoltaiczne: a) monokrystaliczne, b) polikrystaliczne



Rys. 3. Schemat pokazujący efekt fotowoltaiczny



Rys. 4. Charakterystyka prądowo-napięciowa diody krzemowej

W celu określenia przydatności, oceny zastosowanej technologii wytwarzania ogniw fotowoltaicznych konieczne jest wyznaczenie ich własności

elektrycznych. W tym celu wykonuje się pomiar charakterystyk prądowo-napięciowych. Charakterystykę jasną i ciemną (gdy ogniwo jest nieoświetlone)

prądowo-napięciową ogniwa słonecznego pokazano na rysunku 5. Zmieniając wartość rezystancji na charakterystykach można określić charakterystyczne punkty pracy ogniwa fotowoltaicznego:

- stan zwarcia, gdy $R_{ob} = 0$, to $U = 0, I = I_{SC}$,
- stan bez obciążenia, gdy $R_{ob} = \infty$, to $U = U_{OC}, I = 0$,
- punkt maksymalnej mocy P_m gdy $R_{ob} = R_{optymalnej}$ $U = U_m, I = I_m$,

gdzie I_{SC} oznacza prąd zwarcia, U_{OC} określany jest jako napięcie obwodu otwartego, U_m, I_m są odpowiednio wartościami napięcia i prądu w punkcie maksymalnej mocy. Charakterystyka prądowo-napięciowa idealnego ogniwa słonecznego ma kształt prostokąta o bokach U_{OC}, I_{SC} (rys. 5), a jego maksymalna moc jest równa iloczynowi:

$$P_{id} = U_{OC} I_{SC} \quad (1)$$

W praktyce nie można osiągnąć charakterystyki prostokątnej, w związku z czym maksymalna moc rzeczywistego ogniwa jest zawsze mniejsza od idealnego (rys. 4) i obliczana jest ze wzoru:

$$P_m = U_m I_m \quad (2)$$

Stopień dopasowania rzeczywistej charakterystyki prądowo-napięciowej do idealnej określa współczynnik wypełnienia FF wyrażany wzorem:

$$FF = \frac{U_m I_m}{U_{OC} I_{SC}} = \frac{P_m}{P_{id}} \quad (3)$$

który zawsze jest mniejszy od 1. Im bardziej kształt charakterystyki prądowo-napięciowej ogniwa rzeczywistego zbliżony jest do charakterystyki ogniwa idealnego tym wartość współczynnika wypełnienia bliższa jest jedności.

Najważniejszym parametrem ogniwa fotowoltaicznego jest sprawność konwersji energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną, która jest zdefiniowana:

$$E_{ff} = FF \frac{U_{OC} I_{SC}}{P_{in} A_0} \cdot 100\% \quad (4)$$

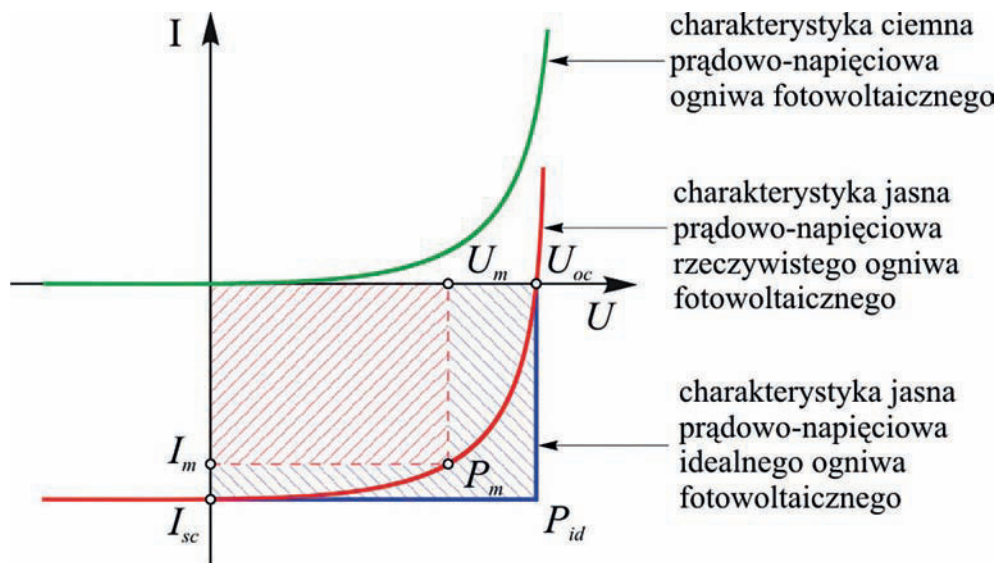
gdzie: P_{in} – natężenie promieniowania słonecznego padającego na ogniwo słoneczne, A_0 – powierzchnia ogniwa fotowoltaicznego.

W Laboratorium Badania Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych w Instytucie Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych Politechniki Śląskiej w Gliwicach badania własności elektrycznych ogniw fotowoltaicznych, w tym jasne i ciemne charakterystyki prądowo-napięciowe są wykonywane przy użyciu systemu SS I-V CT-02 firmy PV Test Solutions Tadeusz Zdanowicz (rys. 6). Stanowisko składa się z: symulatora promieniowania słonecznego, układu pomiarowego wraz z systemem akwizycji danych, stolika pomiarowego z sondami oraz jednostki kontroli temperatury



facebook.pl / labportal

Wejdź i polub nas!



Rys. 5. Charakterystyka jasna i ciemna prądowo-napięciowa ogniwa fotowoltaicznego



Rys. 6. Stanowisko do pomiaru charakterystyk prądowo-napięciowych ogniw SS I V CT 02

stolika. Symulator światła słonecznego pracuje w klasie pomiarowej AAA określonej zgodnie z normą IEC 60904-09. Jednorodność natężenia światła gwarantowana jest na powierzchni 15×15cm. Możliwy jest pomiar charakterystyk prądowo-napięciowych w warunkach STC (z ang. Standard

Test Conditions) wg normy europejskiej o numerze IEC 61853-1 czyli w temperaturze 25°C, przy natężeniu promieniowania słonecznego 1000 W/m² i dla widma AM1,5 oraz w zakresie temperatury od ~0 do 60°C. Stanowisko przeznaczone jest do pomiaru własności elektrycznych

krzemowych, barwnikowych, polimerowych oraz perowskitowych ogniw fotowoltaicznych.

Dodatkowo stanowisko wyposażone jest w specjalnie zaprojektowaną na zlecenie Instytutu przystawkę do pomiaru barwnikowych ogniw fotowoltaicznych (rys. 7).

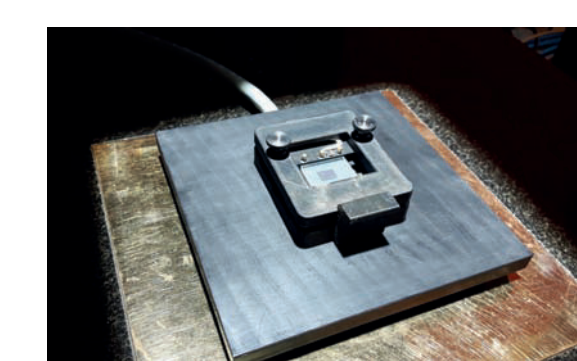


Do kalibracji urządzenia wykorzystywane są ogniwa wzorcowe w tym certyfikowane przez Instytut ISE Fraunhofer z filtrem KG-5 (rys. 8).

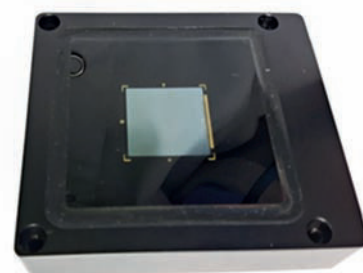
Przykładowe pomiary charakterystyk prądowo napięciowych jasnych i ciemnych krzemowych ogniw fotowoltaicznych przedstawiono na rys. 9.

Na podstawie zmierzonych jasnych charakterystyk wyznacza się między innymi: prąd zwarcia I_{SC} , prąd w punkcie mocy maksymalnej I_{mp} , napięcie obwodu otwartego U_{OC} , napięcie w punkcie mocy maksymalnej U_{mp} , moc maksymalną P_{mp} , współczynnik wypełnienia charakterystyki FF , sprawności przetwarzania promieniowania słonecznego na energię elektryczną E_{ff} (rys. 10). Z kolei na podstawie ciemnych charakterystyk można wyznaczyć rezystancję szeregową badanego ogniwa słonecznego.

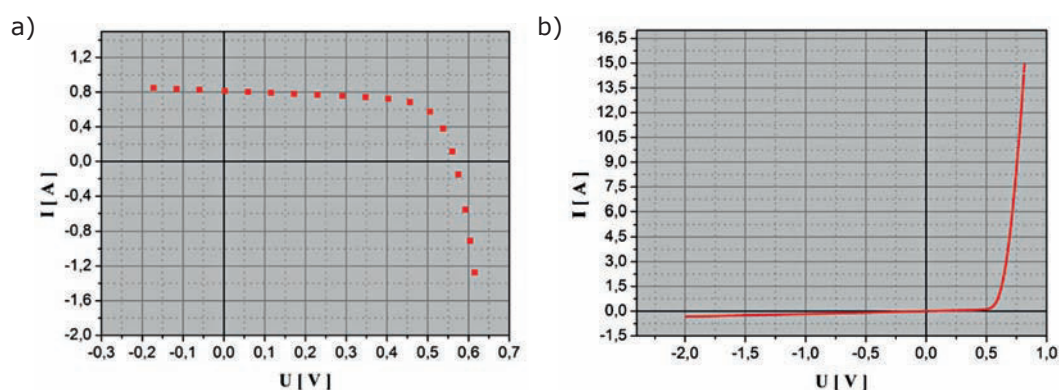
Dodatkowo laboratorium Badania Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych wyposażone jest w specjalistyczną aparaturę badawczą Corescan i Sherescan firmy Sunlab. Urządzenie Corescan umożliwia mapowanie rezystancji kontaktu pomiędzy emiterym a elektrodą przednią krzemowego ogniwa fotowoltaicznego. Dodatkowo pozwala na wizualizację lokalnych strat w krzemie i ogniwach fotowoltaicznych, mapowanie prądu zwarcia oraz napięcia obwodu otwartego. Z kolei urządzenie Sherescan pozwala na pomiar rezystancji powierzchniowej krzemu po procesie dyfuzji, rezystancji kontaktu elektrycznego ogni-



Rys. 7. Przystawka do pomiaru własności elektrycznych barwnikowych ogniw fotowoltaicznych



Rys. 8. Certyfikowane ogniwo wzorcowe z filtrem KG-5

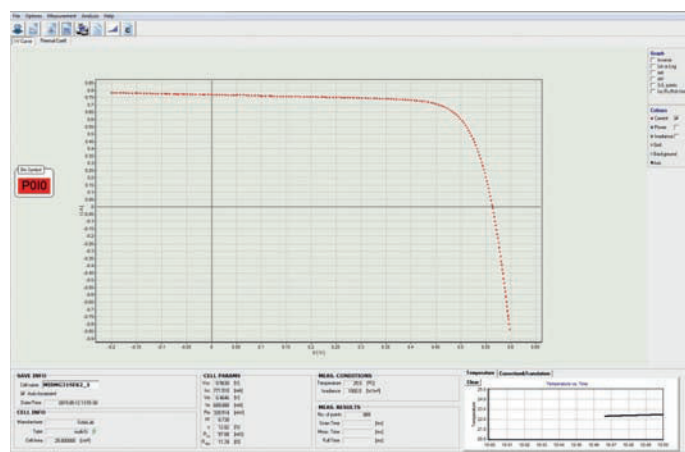


Rys. 9. Przykłady charakterystyk prądowo-napięciowych krzemowych ogniw fotowoltaicznych: a) jasnych, b) ciemnych

wa fotowoltaicznego oraz rozpoznanie typu przewodnictwa krzemu.

Urządzenie Corescan umożliwia pomiary własności elektrycznych kilkoma metodami. Na rys. 11 przedstawiono pomiar rozkładu prądu zwarcia w krzemowym ogniwie fotowoltaicznym metodą LBIC (z ang. Light Beam Induced Current), skanując całą powierzchnię ogniwa słonecznego wiązką światła o średnicy 9 mm. Można określić dzięki temu wpływ warstwy antyrefleksyjnej na czas życia nośników mniejszościowych.

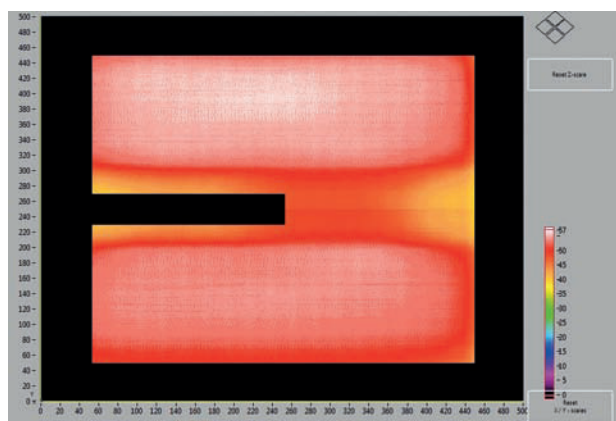
Urządzenie Sherescan umożliwia rozpoznanie typu przewodnictwa i pomiaru rezystancji powierzchniowej oraz



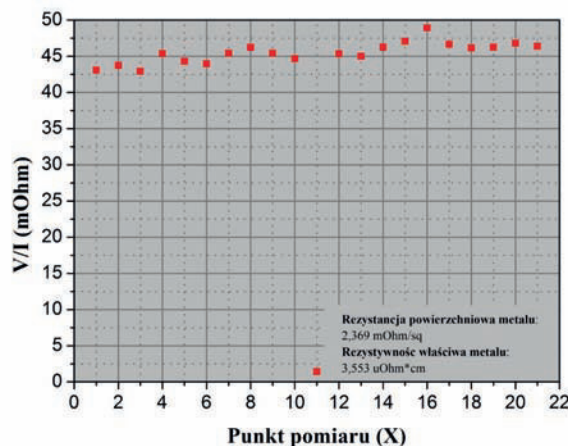
Rys. 10. Przykładowa charakterystyka prądowo-napięciowa krzemowego ogniwa fotowoltaicznego z wyznaczonymi parametrami elektrycznymi

rezystancji przedniego kontaktu elektrycznego krzemowego ogniwa fotowoltaicznego. Na tej podstawie wyznacza się rezystancję powierzchni-

wą [w Ω/\square] metalowych kontaktów elektrycznych ogniwa fotowoltaicznego (rys. 12). Zasada pomiaru oparta jest na zeskanowaniu sondą czte-



Rys. 11. Rozkład prądu zwarcia na powierzchni krzemowego ogniwa fotowoltaicznego



Rys. 12. Pomiar rezystancji powierzchniowej metalu oraz rezystywności właściwej przedniego kontaktu elektrycznego krzemowego ogniwa fotowoltaicznego

rostrzową kilku punktów w centralnej części metalowej powierzchni, w wyniku czego mierzona jest rezystancja metalu.

Zakres badań oferowanych w Laboratorium Badania Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych obejmuje:

- rozpoznanie typu przewodnictwa płytki krzemowej,
- pomiary charakterystyk prądowo-napięciowych krzemowych, polimerowych oraz barwnikowych ogniw fotowoltaicznych,
- wyznaczenie prądu zwarcia I_{SC} , prądu w punkcie mocy maksymalnej I_M , napięcia obwodu otwartego U_{OC} , napięcia

w punkcie mocy maksymalnej U_M , mocy maksymalnej P_M , współczynnika wypełnienia charakterystyki FF , sprawności przetwarzania promieniowania słonecznego na energię elektryczną E_{ff}

- pomiar rezystancji szeregowej krzemowych ogniw fotowoltaicznych,
- mapowanie prądu zwarcia I_{SC} oraz napięcia obwodu otwartego U_{OC} krzemowego ogniwa fotowoltaicznego,
- wizualizację lokalnych strat w krzemie i krzemowych ogniwach fotowoltaicznych,
- mapowanie rezystancji kontaktu pomiędzy emiterem a elektrodą przednią krzemo-

wego ogniwa fotowoltaicznego,

- pomiar rezystancji kontaktu elektrycznego ogniwa fotowoltaicznego.

Technologia wytwarzania ogniw fotowoltaicznych jest skomplikowana i składa się z wielu etapów, z których każdy wymaga kontroli jakości. Pomiary własności elektrycznych umożliwiają między innymi określenie czy zakupione płytki krzemowe są dobrej jakości i o odpowiednim typie przewodnictwa. Umożliwiają również kontrolę czy prawidłowo wykonany został proces dyfuzji. Na ich podstawie

można określić czy prawidłowo osadzono warstwę pasywującą oraz kontakty metaliczne. Straty energetyczne, które towarzyszą konwersji, czyli absorpcji promieniowania słonecznego i generacji fotoprądu, wpływają na najważniejszy parametr użytkowy ogniwa PV – jego sprawność energetyczną.

1) Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska w Gliwicach

2) Centrum Projektowo-Badawczo-Produkcyjne Inżynierii Medycznej i Stomatologicznej ASKLEPIOS

Dokończenie ze str. 20.

[3] Florczak A., *Engineered spider silk: the intelligent biomaterial of the future. Part I*, 2011;65:377–88

[4] A. J. Cozzone, *Proteins: Fundamental Chemical Properties*, Encyclopedia of Life Science, University of Lyon, 2010

[5] Edwards, H. G. M.; Farwell, D. W., *Raman Spectroscopic Studies of Silk*, J. Raman Spectrosc. 1993, 26, 901–909

[6] Shao J., Zheng J., Liu J., Carr C.M., *Fourier transform Raman and Fourier transform infrared spectroscopy studies of silk fibroin*, Journal of Ap-

plied Polymer Science, 2005, 96(6):1999–2004

[7] J. Sirichaisit, et. al., *Analysis of Structure/Property Relationships in Silkworm (Bombyx mori) and Spider Dragline (Nephila edulis) Silks Using Raman Spectroscopy*, Biomacromolecules 4, 2003, 387-394

[8] E. Lepore, et. al., *Evidence of the Most Stretchable Egg Sac Silk Stalk, of the European Spider of the Year*, PLoS ONE 7(2): e30500, 2012

* Wydział Fizyki Technicznej Politechniki Poznańskiej, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań