

Charakteryzacja cienkowarstwowych ogniw słonecznych na podstawie pomiarów i symulacji ich charakterystyk pojemnościowych

Streszczenie. W artykule przedstawiono możliwości analizy parametrów ogniw słonecznych na podstawie pomiarów ich charakterystyk pojemnościowych. Prezentowane prace dotyczą symulacji numerycznych oraz pomiarów rzeczywistych charakterystyk pojemności złączonej cienkowarstwowych ogniw słonecznych. Na podstawie symulacji numerycznych i pomiarów dokonano obliczeń takich parametrów jak wykres Mott-Schottky'ego, gęstość domieszkowania w zależności od napięcia flat-band, czy też rozkład domieszek w słabiej domieszkowanym obszarze ogniwa. Praca prezentuje także problemy dotyczące konstrukcji i wykonania a także prowadzenia i interpretacji pomiarów przy pomocy specjalnie zaprojektowanego stanowiska badawczego.

Abstract. The article presents issues connected with analysis of solar cells parameters based on their junction capacitance measurements. Presented investigation was based on numerical simulations, and indirect and direct measurements of thin -film solar cells capacitance characteristics. Using all described methods many parameters, namely Mott-Schottky characteristics, density of doping according to flat-band potential and base region doping level were calculated. The work presents also problems connected with construction and operation of the laboratory setup for C_j measurements as well as possible interpretation of obtained results. (**Characterisation of thin-film solar cells on the base of capacitance simulations and measurements**).

Słowa kluczowe: ogniwa słoneczne, C-V, pojemność złączowa, SCAPS, wykres Mott-Schottky'ego.

Keywords: solar cells, C-V, junction capacitance, SCAPS, Mott-Schottky graph.

Charakterystyki pojemnościowe ogniw słonecznych

Powstanie warstwy zubożonej w złączu p-n ogniwa słonecznego powoduje generację bariery potencjałów. Naładowane jony donorowe i akceptorowe mogą być uznawane wówczas za kondensator płaski i mogą być opisane przez analogię podobnymi zależnościami. Szerokość obszaru przestrzennego jest wówczas odległością między „okładzinami kondensatora”. Gdy złącze zostaje spolaryzowane w kierunku zaporowym szerokość bariery potencjałów rośnie, a co za tym idzie zmniejsza się koncentracja nośników wprowadzanych do obszaru złącza. Pojemność zastępcza kondensatora utworzonego z warstwy zubożonej maleje wówczas zgodnie z zależnością (1).

$$(1) \quad C_j = \frac{K_S \cdot \epsilon_0 \cdot A}{W}$$

gdzie: C_j – pojemność złącza, ϵ_0 – bezwzględna przenikalność dielektryczna, K_S – względna przenikalność dielektryczna materiału półprzewodnikowego, A – powierzchnia złącza, W – szerokość ładunku przestrzennego.

Dzięki praktycznemu wykorzystaniu powyższej zależności, pomiary pojemności złączowej ogniw słonecznych stały się ważnym i użytecznym narzędziem charakteryzacji tych przyrządów. Za jej pomocą można wyliczyć między innymi poziom domieszkowania słabiej domieszkowanego regionu złącza, zgodnie z zależnością (2).

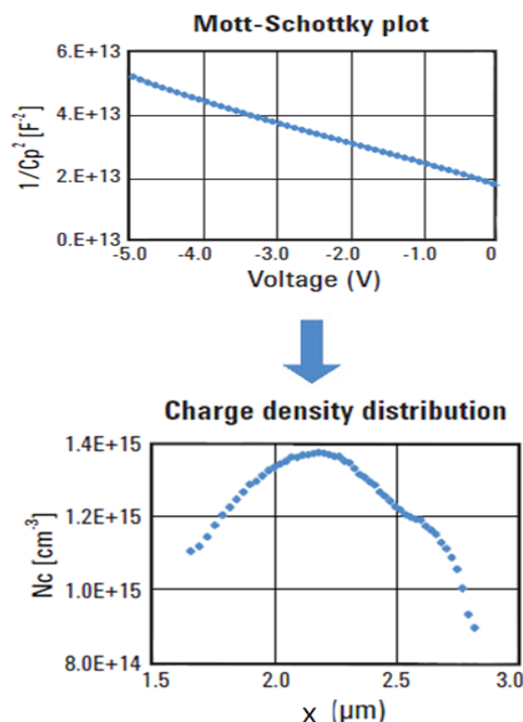
$$(2) \quad N_B(x) = \frac{2}{q \cdot K_S \cdot \epsilon_0 \cdot A^2 \cdot \left[\frac{d\left(\frac{1}{C_j}\right)}{dV_A} \right]}$$

gdzie: $N_B(x)$ – poziom domieszkowania słabiej domieszkowanego regionu, x – odległość od złącza p-n, V_A – napięcie polaryzacji, Q – ładunek elementarny.

Znajomość charakterystyki pojemnościowo-napięciowej ogniwa pozwala również na otrzymanie wykresu Mott-Schottky'ego. Ta charakterystyka pozwala na wykreślenie

rozkładu gęstości ładunku elektrycznego w półprzewodniku i zależność konduktancji od napięcia polaryzującego. Przykładowe charakterystyki, zarówno Mott-Schottky'ego jak i rozkład ładunku elektrycznego, przedstawione zostały na rysunku 1.

Ze względu na potencjalną atrakcyjność zależności pojemnościowych dla charakteryzacji przyrządów fotowoltaicznych prowadzone są zarówno pomiary tych parametrów dla wybranych konstrukcji eksperymentalnych jak i symulacje numeryczne takich charakterystyk za pomocą dedykowanego oprogramowania specjalistycznego dla różnych typów ogniw [2-4].

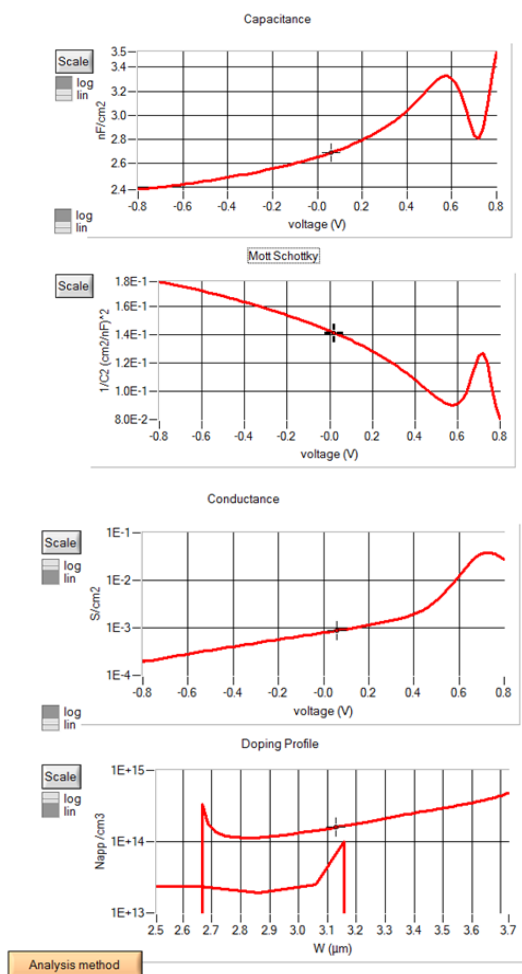


Rys. 1. Otrzymany na podstawie charakterystyki C-V wykres Mott-Schottky'ego oraz obliczony na jego podstawie rozkład gęstości ładunków w odległości od złącza p-n [1]

Symulacje numeryczne z wykorzystaniem programu SCAPS

Program SCAPS (*Solar Cell Capacitance Program*) jest specjalistycznym dedykowanym programem naukowym służącym do przeprowadzania symulacji numerycznych ogniw słonecznych o wielowarstwowej strukturze, zaprezentowanym po raz pierwszy w roku 1996 podczas konferencji Photovoltaic Specialists Conference [5]. Program SCAPS jest utworzony w środowisku Lab Windows/CVI a do jego podstawowych funkcji należy obliczanie i wizualizacja wszystkich najważniejszych parametrów elektrycznych polikrystalicznych, cienkowarstwowych ogniw słonecznych w szczególności z grupy a- Si, CdS/CdTe, oraz CIGS, co jest wykorzystywane w eksperymentach technologicznych autorów.

Symulacje numeryczne dzielą się na dwa etapy, które polegają na znalezieniu rozwiązań stałoprądowych w węzłach siatki, gdzie poszukiwanymi wielkościami są potencjał i koncentracja nośników a następnie na przeprowadzeniu analizy AC dla małych sygnałów wokół wyznaczonego punktu pracy. W ten sposób uzyskiwane są między innymi charakterystyki prądowo-napięciowe I-V, charakterystyki pojemnościowe C-V, charakterystyki pojemnościowo-częstotliwościowe C-f, oraz wydajności kwantowej $Q(\lambda)$. Przykładową charakterystykę C-V, dla struktury ogniwa słonecznego CdS/CdTe, badanego przez autora, uzyskaną w programie SCAPS, przedstawia rysunek 2.



Rys. 2. Charakterystyka C-V dla badanego, cienkowarstwowego ogniwa słonecznego CdS/CdTe i jej pochodne w postaci wykresu konduktancji, wykresu Mott-Schottky'ego oraz profilu domieszkowania obliczane w programie SCAPS

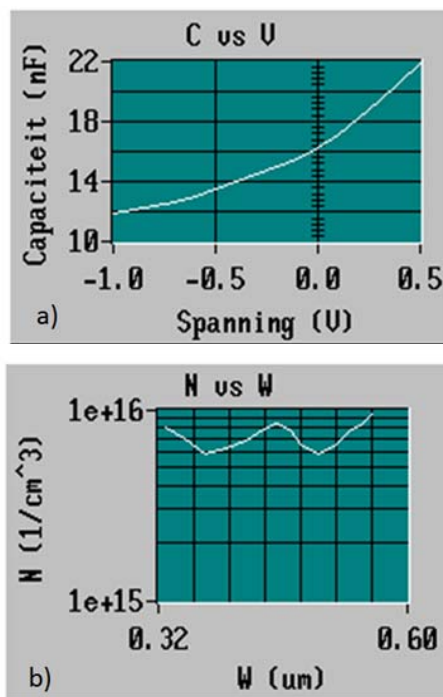
Pomiary pośrednie charakterystyk pojemnościowych

Metody wyznaczania charakterystyki pojemnościowej rzeczywistego ogniwa fotowoltaicznego możemy podzielić na pośrednie i bezpośrednie. Pierwszy sposób polega na wyznaczeniu innych, niż pojemność, parametrów ogniwa i następnie za ich pomocą oraz przy użyciu odpowiednich wzorów obliczeniu interesującej nas wartości. Do tej metody należą np.: Impedancyjny Pomiar Pojemności AC (zwany nieraz pomiarem RLC) oraz Quasi-statyczny Pomiar Pojemności [6]. Druga metoda sprowadza się do spolaryzowania nieoświetlonego modułu, w którym przy pomocy miernika pojemności zmierzona zostaje wartość pojemności złącza p-n w półprzewodniku.

W ramach prowadzonych badań przetestowano obie wymienione metody, konstruując samodzielnie stanowisko przeznaczone do bezpośredniego pomiaru charakterystyk C-V. Pierwszą testowaną metodą były pomiary pośrednie za pomocą wielozakresowego, komercyjnego miernika RLC, sprzężonego z komputerem. Pomiary przeprowadzono w zakresie $-1 \text{ V} \div 0,5 \text{ V}$ przy częstotliwości 100 kHz. Ogniwiem testowym była cienkowarstwowa polikrystaliczna hetero struktura InGa/ITO/CdS/CdTe/Cu o powierzchni $0,8 \text{ cm}^2$ otrzymana przy pomocy stosowanej uprzednio przez autora technologii ICSVT [7] w celu porównania jej z testowaną alternatywnie metodą sitodruku [8]. Parametry elektryczne ogniwa testowego przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry technologiczne i elektryczne otrzymanej struktury testowej CdS/CdTe

Voc [V]	Isc [mA]	FF [%]	Rs [Ω]	Gsh [S]	Jsc [mA/cm ²]	η [%]	A [cm ²]
0,57	14,69	42	17,23	0,005	18,36	4,37	0,8
Grubość warstwy CdTe [μm]		Grubość warstwy CdS [μm]		Temperatura rekrytalizacji [°C]		Technologia	
1		0,2		600		ICSVT	



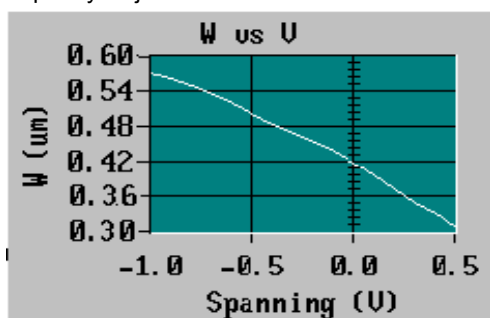
Rys. 3. Charakterystyka C-V ogniwa CdS/CdTe pomierzona metodą Impedancyjnego Pomiaru Pojemności a) oraz wyliczony jej podstawie rozkład domieszkowania warstwy bazy otrzymanego ogniwa b)

Za pomocą pomiaru pośredniego otrzymano charakterystykę C-V a na jej podstawie korzystając z zależności 2 obliczono poziom domieszkowania warstwy bazy ogniwa, co przedstawiają rysunki 3a i 3b.

Następnie przekształcając zależność 2) do postaci 3) obliczono szerokość warstwy ładunku przestrzennego ogniwa w zależności od napięcia polaryzacji, co przedstawia rysunek 4.

$$(3) \quad W = \sqrt{\frac{2K_S \cdot \epsilon_0}{q \cdot N_B} \cdot (V_{bi} \cdot V_A)}$$

gdzie: V_{bi} – napięcie wynikające z potencjału złącza, V_A – napięcie polaryzacji.

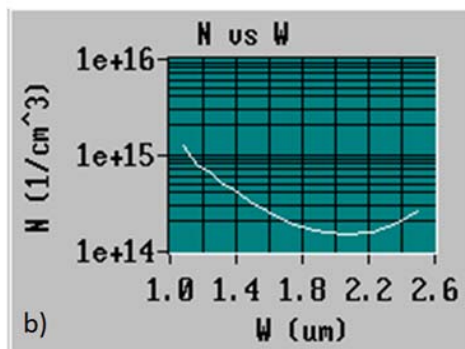
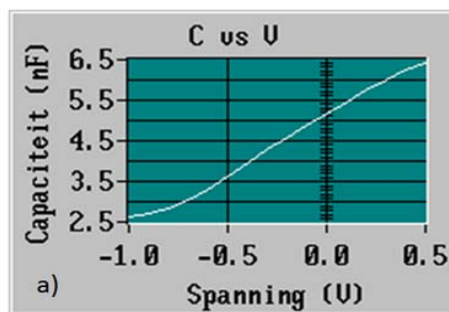


Rys. 4. Zależność szerokości warstwy zubożonej od napięcia polaryzacji dla badanego ogniwa CdS/CdTe

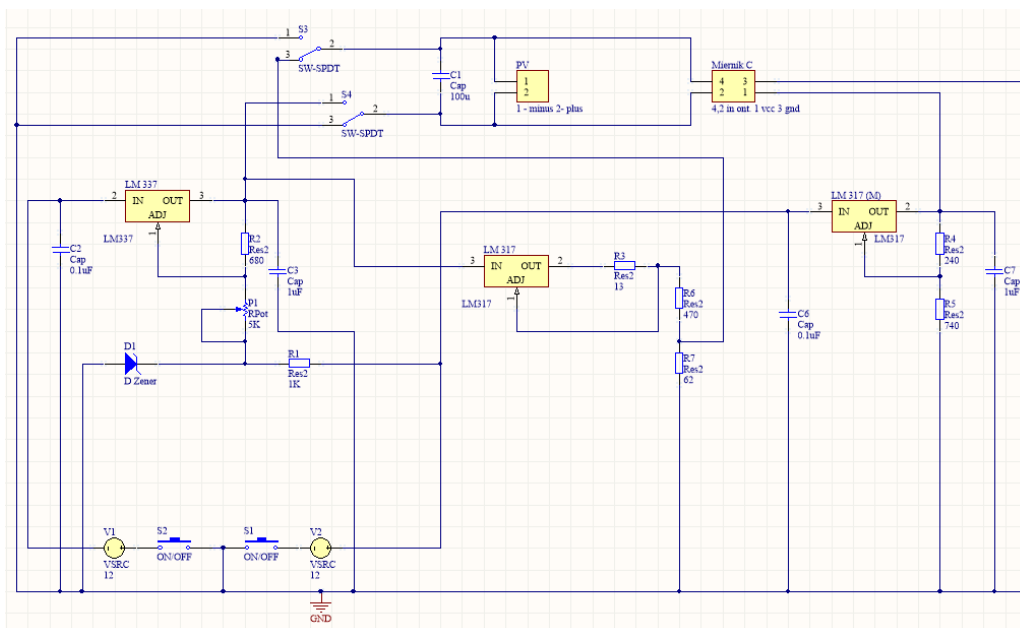
Otrzymana charakterystyka C-V prezentuje klasyczny przebieg wykładniczy z jedynie niewielkimi odchyleniami na poziomie poniżej 3% wartości względnej od wykresu idealnego, co odpowiada parametrom modelowym otrzymanym w symulacjach numerycznych. Obliczony na jej podstawie poziom domieszkowania warstwy bazy utrzymuje się w granicach $5 \cdot 10^{15} \div 7 \cdot 10^{15} \text{ 1/cm}^3$, co jest poprawnym wynikiem dla warstw absorbera na bazie CdTe w celu utrzymania niskiej wartości rezystancji szeregowej bez zbędnego skracania czasu życia nośników mniejszościowych w obszarze bazy.

Dla porównania analogiczne pomiary przeprowadzono dla struktury fotowoltaicznej CdS/CdTe o identycznej budowie i wymiarach, wykonanej za pomocą techniki sitodruku o grubości emitera i bazy odpowiednio 0,1 μm i 3 μm . Wyniki tych pomiarów przedstawia rysunek 5.

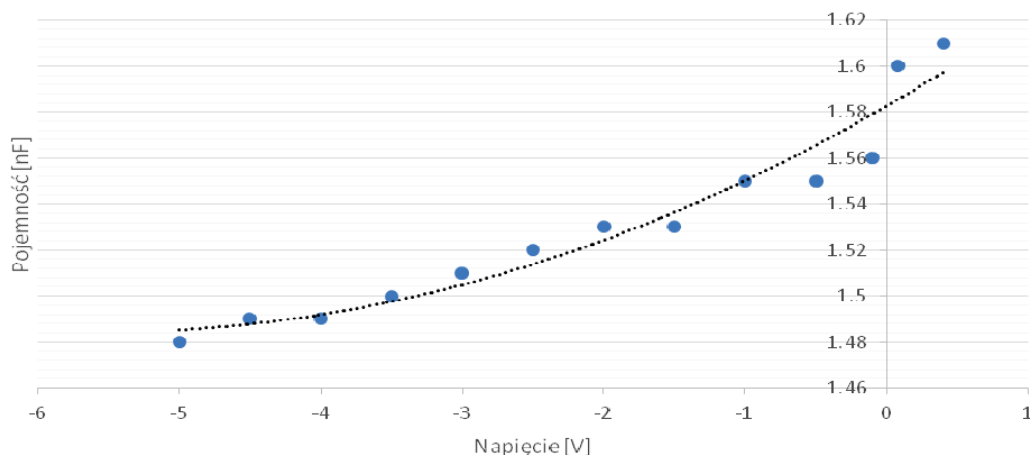
Otrzymane wartości wskazują na nierównomierny i niezgodny z oczekiwaniami i wynikami symulacji SCAPS rozkład charakterystyki C-V. Wyliczony na jej podstawie poziom domieszkowania bazy ogniwa drukowanego waha się w granicach $1,1 \cdot 10^{15} \div 1 \cdot 10^{14} \text{ 1/cm}^3$, co jest wartością zbyt niską dla osiągnięcia właściwej rezystancji szeregowej bazy. Jednocześnie można stwierdzić, iż porównanie struktura bazy wykonanej metodą sitodruku prezentuje wysoką niejednorodność zarówno pod względem budowy fizycznej jak i poziomu domieszkowania. Uzyskane wyniki znalazły swoje odbicie w niskiej łącznej sprawności fotokonwersji ogniwa, nie przekraczającej 2%, oraz na drodze analizy morfologicznej warstw.



Rys. 5. Charakterystyka C-V ogniwa CdS/CdTe wykonanego metodą sitodruku a) oraz obliczony na jej podstawie profil domieszkowania bazy tego ogniwa



Rys. 6. Schemat elektryczny opracowanego układu do pomiarów bezpośrednich pojemności złączeniowej ogniwa słonecznych



Rys. 7. Charakterystyka C-V elastycznego mini-modułu amorficznego Power Film MP-37 wraz z aproksymacją wykładniczą, pomierzona bezpośrednio za pomocą skonstruowanego stanowiska pomiarowego

Pomiar charakterystyki C-V metodą bezpośrednią

W celu prowadzenia pomiarów pojemności złączowej metodą bezpośrednią zaprojektowano odpowiedni układ na bazie dwóch zasilaczy zapewniających zmienną polaryzację i miernika pojemności LC100-A o częstotliwości generatora 500 kHz. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 6. Wybór polaryzacji układu wykonywany jest za pomocą przełączników S3 oraz S4.

Minimalna wartość pojemności mierzonej wynosi 0,01 pF. Dokładność pomiaru zależy od przyjętego zakresu. Dla najczęściej wykorzystywanego zakresu niepewność pomiarowa wynosi 1%. Do jednoczesnego pomiaru napięcia polaryzacji wykorzystywany jest woltomierz cyfrowy pracujący w zakresie -20 V do +20 V z dokładnością 0,5%. Dla stanowiska zaprojektowano specjalny układ odczytu wyników oraz obudowę z możliwością montażu ogniw i mini-modułów o powierzchni łącznej nie przekraczającej 100 cm², co jest również ograniczone zakresem spodziewanych wartości pojemności złączowej dla większych konstrukcji eksperymentalnych. Docelowo układ wyposażony zostanie w algorytm wyliczający wszystkie wartości pochodne mierzonej pojemności. Pierwsze przykładowe wyniki dla mini modułu a-Si firmy PowerFilm przedstawia rysunek 7. Należy zauważyć, że otrzymana charakterystyka C-V odpowiada zarówno co do zakresu wartości jak i przebiegu wynikom symulacyjnym dla analogicznej konstrukcji ogniw amorficznych.

Skonstruowane stanowisko umożliwia stosunkowo dokładny pomiar bezpośredni charakterystyk złączowych ogniw słonecznych za pomocą taniej, powszechnie dostępnej aparatury. Na jego podstawie planowana jest weryfikacja uzyskanych wcześniej wyników symulacji i pomiarów pośrednich, a także analiza przygotowywanych konstrukcji ogniw elastycznych CdS/CdTe.

LITERATURA

- [1] Agilent Technologies, IV and CV Characterizations of Solar/Photovoltaic Cells Using the B1500A, Application Note. Agilent Technologies Inc. 2009
- [2] Niemegeers A., Burgelman M., Effects of the Au/CdTe back contact on IV and CV characteristics of Au/CdTe/CdS/TCO solar cells, *J. Appl. Phys.* 81, 2881 (1997)
- [3] Scharber M., Mühlbacher D., Koppe M., Denk P., Waldauf C., Heeger A.J., Brabec C., Design Rules for Donors in Bulk-Heterojunction Solar Cells—Towards 10% Energy-Conversion Efficiency, *Adv. Mater.* 2006, 18, 789-79
- [4] Saito Y., Kubo W., Kitamura T., Wada Y., I-I 3- redox reaction behavior on poly (3, 4-ethylenedioxythiophene) counter electrode in dye-sensitized solar cells, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* Vol 164, Iss 1-3, 1 2004, 153-157
- [5] Niemegeers A., Burgelman M., Numerical modelling of ac-characteristics of CdTe and CIS solar cells, *Proc. 25th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, New York (1996), 901-904
- [6] Bisquert J., Vikhrenko V., ‡ Interpretation of the time constants measured by kinetic techniques in nanostructured semiconductor electrodes and dye-sensitized solar cells, *J. Phys. Chem. B*, 2004, 108 (7), 2313-2322
- [7] Sibiński M., Lisik Z., Polycrystalline CdTe solar cells on elastic substrates, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences* Vol 55, Iss 3, 2007, 287-292
- [8] Sibiński M., Znajdek K., Innovative Elastic Thin-Film Solar Cell Structures. *Solar Cells - Thin Film Technologies*. Ed. L. A. Kosyachenko, InTech, Rijeka: 2011, 253-274

Autorzy: dr hab. inż. Maciej Sibiński, Politechnika Łódzka, Katedra Przyrządów Półprzewodnikowych i Optoelektronicznych, ul. Wólczańska 211/215, 90-924 Łódź, E-mail: maciej.sibinski@p.lodz.pl; dr inż. Katarzyna Znajdek, Politechnika Łódzka, Katedra Przyrządów Półprzewodnikowych i Optoelektronicznych, ul. Wólczańska 211/215, 90-924 Łódź, E-mail: katarzyna.znajdek@p.lodz.pl; Piotr Stanisławski, Politechnika Łódzka, Katedra Przyrządów Półprzewodnikowych i Optoelektronicznych, ul. Wólczańska 211/215, 90-924 Łódź.