

Kazimierz DRABCZYK

KONTAKTY ELEKTRYCZNE KRYSTALICZNYCH KRZEMOWYCH OGNIW FOTOWOLTAICZNYCH

STRESZCZENIE *W niniejszym artykule przedstawiono informacje na temat stosowanych obecnie technik wykonywania metalicznych kontaktów elektrycznych dla krzemowych ogniw fotowoltaicznych. Obecnie istnieje wiele koncepcji wytwarzania ogniw fotowoltaicznych, a tym samym wiele rodzajów kontaktów metalicznych, pozwalających na przepływ prądu z ogniwa do zewnętrznego obwodu elektrycznego, w którym ono pracuje. Najbardziej popularnym i wciąż najczęściej produkowanym rodzajem ogniwa jest ogniwo na bazie krzemu krystalicznego. Dlatego też w artykule położono nacisk na grubowarstwowe technologie wykonywania przednich elektrod metalicznych. Przedstawiono kontakty wykonane techniką sitodruku, będące przedmiotem badań prowadzonych w Laboratorium Fotowoltaicznym IMiM PAN.*

Słowa kluczowe: *ogniwa słoneczne, kontakty elektryczne, sitodruk*

1. WSTĘP

Fotowoltaika jest obecnie jedną z najdynamiczniej rozwijających się dziedzin nauki i przemysłu. Pomimo ogromnego postępu, wielu badań nad ogniwami drugiej i trzeciej generacji, to ogniwa pierwszej generacji są nadal najpopularniejsze w masowej produkcji [1]. Dominująca rola tego rodzaju ogniw podyktowana jest przede wszystkim względami praktycznymi. Technologia ogniw pierwszej generacji, opartych na płytkach krzemowych i technikach sitodruku, jest dobrze poznana, oferuje stosunkowo wysokie sprawności konwersji energii oraz szeroki dostęp do materiałów i urządzeń produkcyjnych. Nie brakuje też względów ekonomicznych. Ogniwa pierwszej generacji z roku na rok są coraz tańsze [2]. Przyczynia się do tego ciągły spadek cen materiału

dr inż. Kazimierz DRABCZYK
e-mail: kazimierz.drabczyk@wp.pl

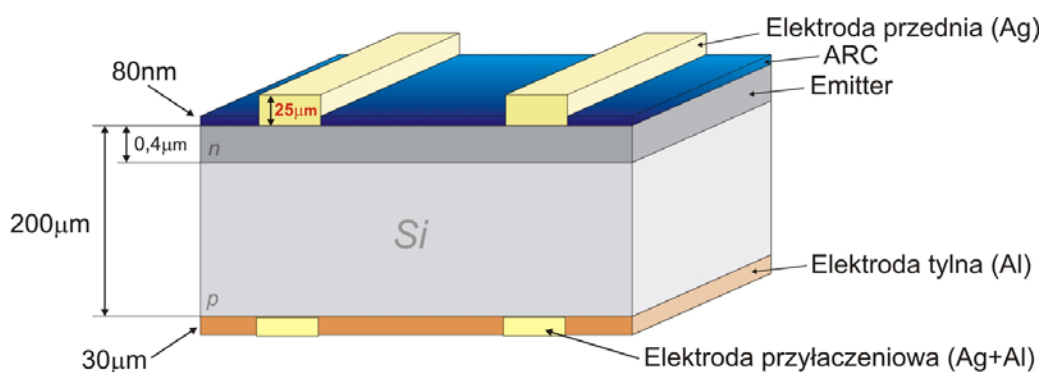
Instytut Metalurgii i Inżynierii Materiałowej PAN
ul. Reymonta 25, 30-059 Kraków

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 264, 2014

bazowego w postaci krzemu krystalicznego, ale także ciągły rozwój obecnie stosowanych technologii produkcyjnych. Wśród wielu elementów ogniwa istotną rolę odgrywają kontakty elektryczne. Odpowiadają one za przepływ prądu z ogniwa do obwodu, w którym ono pracuje oraz mają wpływ na jego parametry elektryczne. Najczęściej stosowaną techniką wytwarzania kontaktów elektrycznych ogniwa – a dokładnie przedniej i tylnej elektrody – jest sitodruk. W ostatnich latach widać ogromny postęp techniki grubowarstwowej, nie mniej jednak dąży się do tego, aby zastąpić ją innymi metodami. Prowadzone są także badania, aby srebro – materiał najczęściej używany do wykonywania przednich kontaktów metalicznych ogniwa – zastąpić innymi metalami, wśród których najpopularniejsza obecnie jest miedź [3]. W niniejszym artykule przedstawiono wybrane alternatywne techniki wytwarzania elektrod ogniwa na bazie krzemu krystalicznego oraz pokazano wyniki badań dotyczących sitodruku przedniej elektrody ogniwa, uzyskane w Laboratorium Fotowoltaicznym Instytutu Metalurgii i Inżynierii Materiałowej PAN.

2. WYBRANE TECHNOLOGIE WYTWARZANIA ELEKTRODY PRZEDNIEJ KRZEMOWEGO OGNIWA SŁONECZNEGO

Badania naukowe w obszarze fotowoltaiki koncentrują się na trzech aspektach: redukcji kosztów, podnoszeniu sprawności oraz szukaniu nowych materiałów bądź rozwiązań technologicznych. Jednym ze sposobów na podniesienie sprawności, przy jednoczesnym obniżeniu kosztów produkcji pojedynczego ogniwa fotowoltaicznego, jest dalsze dopracowywanie procesu wytwarzania przedniej elektrody metalicznej. Typowe krzemowe ogniwo fotowoltaiczne składa się z wielu elementów. Najważniejsze z nich przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat budowy i najważniejsze elementy typowego ogniwa fotowoltaicznego na bazie krzemu krystalicznego

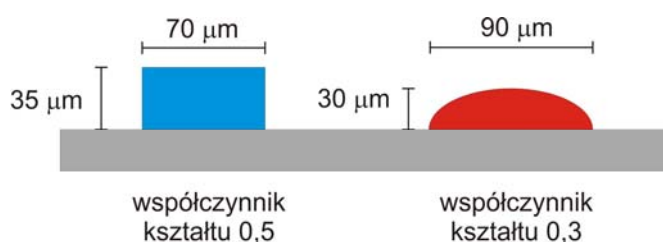
Przedstawione ogniwo fotowoltaiczne jest obecnie najczęściej produkowane i można w nim wyróżnić następujące elementy i obszary:

- przednia i tylna elektroda metaliczna,
- warstwa antyodbiciowa,

- tekstura powierzchni,
- warstwa emiterowa,
- materiał bazowy.

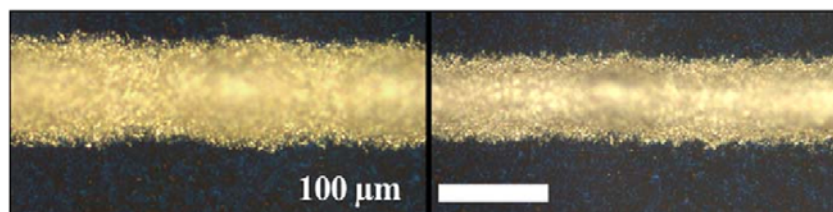
Kontakty elektryczne w tego typu ogniwie wykonywane są głównie metodami grubowarstwowymi. Najczęściej stosowaną techniką jest sitodruk. Technika ta stosowana jest z powodzeniem od wielu lat, także w szeroko pojętym przemyśle elektronicznym. Pomimo tego, że jest to technika dobrze poznana, nadal jest rozwijana i ulepszana. Prace badawcze prowadzone w wielu ośrodkach badawczych na całym świecie koncentrują się odpowiednim doborze coraz nowszych materiałów, takich jak sita, rakle, pasty oraz takich modyfikacjach samego procesu, które mogą przyczynić się do wydruku elektrod o jak najlepszej geometrii. Najważniejszymi parametrami przekroju poprzecznego elektrody są szerokość i współczynnik kształtu, który definiowany jest jako stosunek jego wysokości do szerokości. Idealny współczynnik kształtu zakłada, że przekrój poprzeczny elektrody jest prostokątem o możliwie małej szerokości oraz stosunkowo dużej wysokości, rozumianej w taki sposób, że przekrój czynny elektrody jest na tyle duży, że nie wpływa na wzrost rezystancji szeregowej ogniwa, a szerokość na tyle mała, że ścieżka w jak najmniejszym stopniu zacienia powierzchnię czynną emitera. Wymiary przekrojów i wynikający z nich współczynnik wypełnienia przedstawiono schematycznie na rysunku 2.

Rys. 2. Schematyczne przedstawienie przekroju ścieżki metalizacji o różnym współczynniku kształtu. Z lewej przekrój ścieżki o geometrii idealnej, z prawej ścieżki typowej dla sitodruku



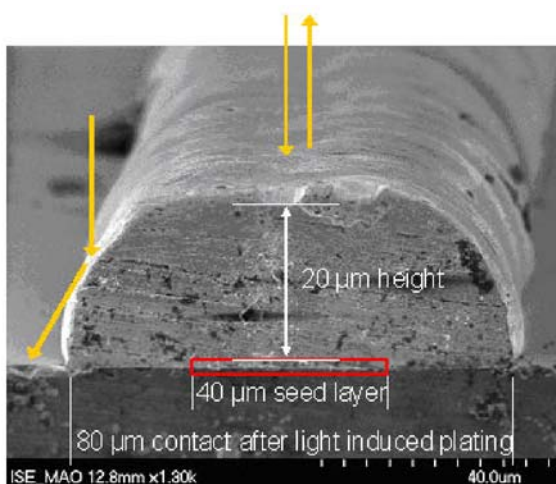
Producenci past i sit nadal pracują nad udoskonaleniem swoich wyrobów stosowanych podczas sitodruku. W przypadku sit stosowane są siatki o coraz cieńszych drutach ze stali nierdzewnej, co pozwala na wykonanie precyzyjnych wzorów przy zachowaniu dużej powierzchni otwartej sita (stosunek pola otwartego do zasłoniętego przez druty siatki). Obecnie producenci oferują sita z siatką, której druty mają średnice od 25 do 16 μm, a powierzchnia otwarta wzoru sita wynosi około 60% [4]. To pozwala na wydruk coraz precyzyjniejszych ścieżek, charakteryzujących się wysokim współczynnikiem kształtu. Także zużycie materiału w postaci pasty metalicznej jest coraz niższe. Natomiast węższe ścieżki mają wpływ na poprawę parametrów elektrycznych ogniwa.

Klasyczna technika sitodruku udoskonalana jest także po przez stosowanie podwyższonej temperatury bądź to podłoża, bądź samego sita. Taka modyfikacja pozwala na wydruk ścieżek o jeszcze lepszych parametrach, z zachowaniem zalet sitodruku (takich, jak duża przepustowość procesu, szeroki dostęp do materiałów) bez konieczności wymiany sitodrukarek na inne urządzenia. Przykładem mogą być prace, gdzie klasyczną metodę sitodruku zmodyfikowano w taki sposób, że podczas wydruku podgrzewano podłoże do wysokiej temperatury. To pozwoliło na redukcję szerokości drukowanej ścieżki, co pokazują zdjęcia na rysunku 3 [5].



Rys. 3. Zdjęcia ścieżek metalizacji wydrukowanych sitem o szerokości wzoru 90 μm . Z lewej dla podłoża o temperaturze pokojowej, z prawej dla podłoża o podwyższonej temperaturze podczas wydruku [5]

Istnieje także wiele innych technik pozwalających na wykonanie elektrody przedniej ogniwa bez wykorzystywania sitodruku. Techniki te są ciągle badane i udoskonalane. Dzięki rezygnacji z technologii sitodruku można było wyeliminować największą jego wadę, to jest ograniczenie szerokości wykonywanych ścieżek. Można przyjąć, że typową szerokością ścieżek w produkowanych masowo ogniwach jest około 100 μm [5]. Natomiast uzyskanie ścieżek o zadowalającej wysokości oraz szerokości poniżej 60 μm nawet w warunkach laboratoryjnych jest bardzo trudne. Do metod, które pozwoliły przekroczyć tę barierę, można zaliczyć techniki, których istotą jest wykonanie na powierzchni krzemu warstwy zarodkowej, która następnie pozwala na osadzenie warstwy metalicznej (najczęściej w procesie elektrochemicznym) oraz techniki z zastosowaniem lasera, które także bazują na osadzaniu metali na powierzchni

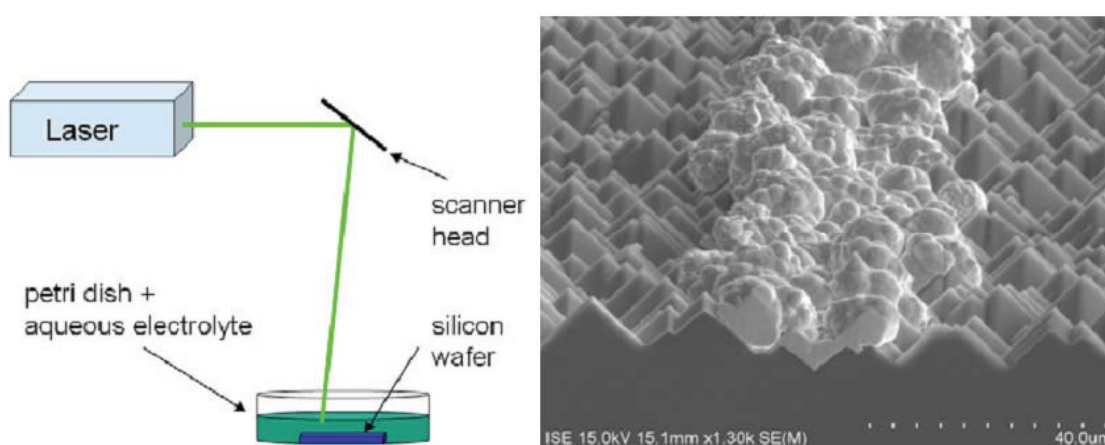


Rys. 4. Przekrój poprzeczny ścieżki metalizacji wykonanej poprzez nałożenie warstwy zarodkowej (*seed layer*) oraz osadzenie na niej warstwy srebra o wysokości 20 μm [7]

krzemu. Warstwa zarodkowa wykonywana jest inną metodą niż sitodruk, dzięki temu jej wymiary, w tym szerokość, mogą być znacznie mniejsze niż w przypadku sitodruku. Jednakże sama warstwa nie jest jeszcze gotową elektrodą, a jedynie bazą (zarodkiem), pozwalającą na osadzenie na niej metalu i tym samym wykonanie kompletnej elektrody. Do pierwszej kategorii takich metod należą na przykład techniki wykonywania elektrod w oparciu o metodę „drukowania” warstwy zarodkowej, określaną jako *aerosol jetting*. Pozwalają one za pomocą specjalnej dyszy na wytworzenie warstwy zarodkowej o szerokości na poziomie 40 μm , a następnie metodą osadzania srebra wykonać ścieżkę o wysokości około 20 μm i szerokości około 80 μm [6, 7]. Ścieżkę metaliczną wykonaną tą metodą przedstawiono na rysunku 4. Uzyskane rezultaty pokazują, że metoda oferuje wykonywanie ścieżek o bardzo dobrej geometrii.

krzemu. Warstwa zarodkowa wykonywana jest inną metodą niż sitodruk, dzięki temu jej wymiary, w tym szerokość, mogą być znacznie mniejsze niż w przypadku sitodruku. Jednakże sama warstwa nie jest jeszcze gotową elektrodą, a jedynie bazą (zarodkiem), pozwalającą na osadzenie na niej metalu i tym samym wykonanie kompletnej elektrody. Do pierwszej kategorii takich metod należą na przykład techniki wykonywania elektrod w oparciu o metodę „drukowania” warstwy zarodkowej, określaną jako *aerosol jetting*. Pozwalają one za pomocą specjalnej dyszy na wytworzenie warstwy zarodkowej o szerokości na poziomie 40 μm , a następnie metodą osadzania srebra wykonać ścieżkę o wysokości około

Do technik wspomaganych laserem można zaliczyć metodę, w której warstwa zarodkowa powstaje na powierzchni płytki krzemowej, która zanurzona w odpowiednim roztworze, poddawana jest oddziaływaniu promieniem lasera. W przedstawionym poniżej przypadku roztworem jest elektrolit zawierający jony niklu Ni^{2+} . Zastosowano laser o długości fali 532 nm o mocach 7, 10 i 13 W. Użycie techniki laserowej pozwala na dobrą kontrolę tego procesu oraz na uzyskanie warstwy zarodkowej o wymaganej szerokości na poziomie 20 μm . Tak powstała warstwa umożliwia osadzanie srebra i wykonanie ścieżki metalizacji o szerokości około 40 μm [8]. Schemat układu, w którym wykonywana jest warstwa zarodkowa oraz widok ścieżki po osadzeniu srebra pokazano na rysunku 5.



Rys. 5. Schemat układu do nanoszenia warstwy zarodkowej ze wspomaganie laserowe oraz widok gotowej ścieżki po osadzeniu warstwy srebra [8]

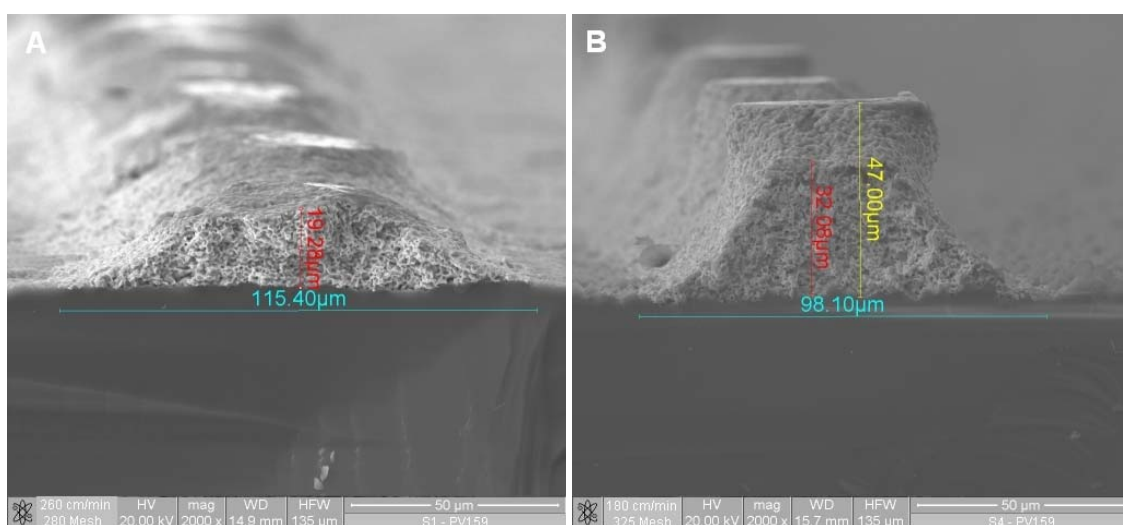
Pokazane techniki wytwarzania elektrody przedniej ogniwa są wybranymi, ale nie jedynymi alternatywami dla procesu sitodruku. Niemniej jednak rodzina technik, w której istotą jest nanoszenie warstwy zarodkowej, a następnie osadzanie na niej warstwy metalu, wydaje się być obecnie najszerzej badana i pokazuje największy potencjał wdrożenia do masowej produkcji.

3. WYBRANE PRACE BADAWCZE DOTYCZĄCE WYTWARZANIA KONTAKTÓW ELEKTRYCZNYCH OGNIWA REALIZOWANE W IMiM PAN

Laboratorium fotowoltaiczne Instytut Metalurgii i Inżynierii Materiałowej Polskiej Akademii Nauk (LF IMiM PAN) od wielu lat prowadzi badania dotyczące technologii wytwarzania ogniw fotowoltaicznych na bazie krzemu krystalicznego. LF IMiM PAN jest jedną z nielicznych placówek badawczych w Polsce, która posiada kompletną, laboratoryjną linię technologiczną, pozwalającą na wytworzenie gotowego

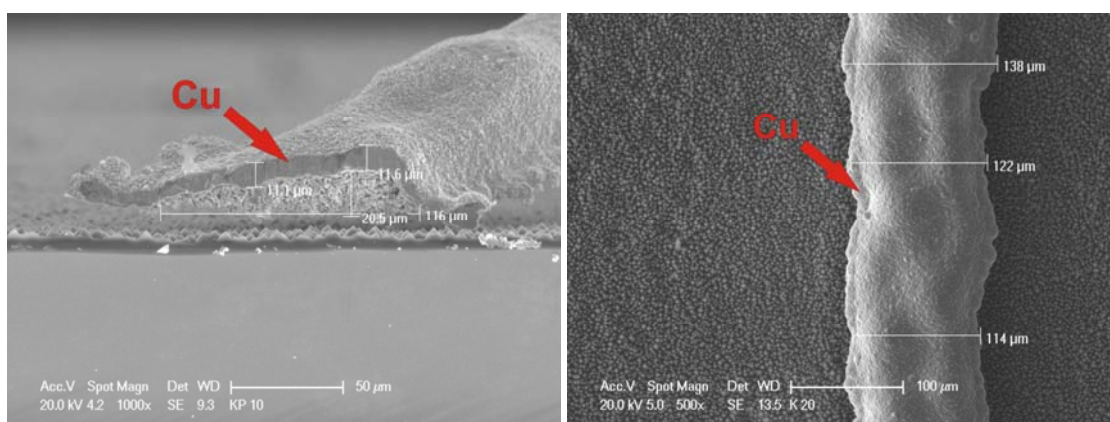
ogniwa oraz modułu fotowoltaicznego, począwszy od obróbki materiału bazowego w postaci płytek krzemowych. Prace badawcze prowadzone w LF IMiM PAN dotyczą także kontaktów metalicznych krzemowego ogniwa słonecznego i koncentrują się na optymalizacji parametrów wytwarzania elektrody przedniej technikami sitodruku. W ostatnim czasie prowadzone są także badania nad elektrodami wykonywanymi dwu-etapowo. Pierwszym etapem jest proces sitodruku z użyciem klasycznej pasty na bazie srebra. W etapie drugim osadzana jest warstwa miedzi metodą elektrochemiczną na wykonanej wcześniej elektrodzie srebrowej. Badania nad osadzaniem elektrochemicznym miedzi prowadzone były we współpracy z Instytutem Katalizy i Fizykochemii Powierzchni PAN w Krakowie.

W pierwszym przypadku prace badawcze skoncentrowano na takiej modyfikacji parametrów mechanicznych procesu sitodruku, aby zapewniały jak najlepszą geometrię przekroju poprzecznego przedniej elektrody ogniwa, co skutkuje poprawą sprawności konwersji ogniwa oraz mniejszym zużyciem pasty metalicznej. Podczas badań zastosowano pasty na bazie srebra firmy DuPont. Modyfikowano prędkość druku, a następnie przeprowadzono badania przekroju poprzecznego pojedynczej elektrody metalicznej z użyciem mikroskopu elektronowego. Na rysunku 6 przedstawiono przekrój poprzeczny elektrod metalicznych wykonanych z użyciem tej samej pasty (PV159) i sita, ale różniących się parametrami wydruku. Dla ścieżki pokazanej na rysunku 6a stosowano prędkość przesuwu rakli 220 cm/min oraz sito o gęstości splotu 280 mesh (splotów na cal). Dla ścieżki o wysokości przekroju poprzecznego od 32 do 47 μm (rys. 6b) zmniejszono prędkość druku do 180 cm/min. Innym parametrem, który zmieniono podczas badań, była gęstość sita. Ze względu na sugestie producenta pasty znajdujące się w karcie katalogowej produktu wykonano sito o gęstości splotu 325 mesh. Przedstawione mikrostruktury pokazują, jak ważny jest dobór odpowiednich parametrów oraz jak duży jest ich wpływ na wynik końcowy. Uzyskane wyniki pokazują także, że uzyskanie dobrego współczynnika kształtu dla ścieżek o szerokości na poziomie 100 μm klasyczną techniką sitodruku jest możliwe [9].



Rys. 6. Przekroje elektrody przedniej ogniwa fotowoltaicznego wykonane w procesie sitodruku o różnych parametrach przesuwu rakli [9]

W przypadku dwuetapowego wykonywania elektrody metalicznej ogniwa, pierwsze prace badawcze pokazały, że możliwe jest powtarzalne i jednorodne osadzanie warstwy miedzi na ścieżce na bazie srebra przed ostatecznym procesem wypalania. Podczas badań osadzono warstwę miedzi o grubości około 12 μm w procesie, w którym ścieżka srebrowa była elektrodą pracującą (katodą), a kontakt elektryczny do ścieżki zrealizowano w sposób mechaniczny. Jako elektroda wspomagająca (anoda) została wykorzystana miedź metaliczna. Osadzanie odbywało się w układzie potencjostatycznym, co pozwoliło uzyskać odpowiednią adhezję pokrycia na podłożu z uwagi na ograniczenie wpływu procesu wydzielania wodoru. Przekrój poprzeczny oraz widok z góry ścieżki metalizacji z osadzoną warstwą miedzi pokazano na rysunku 7 [10].



Rys. 7. Przekroje oraz widok z góry elektrody przedniej ogniwa fotowoltaicznego wykonane w procesie sitodruku i osadzania elektrochemicznego miedzi [10]

Podstawową wadą proponowanego rozwiązania jest fakt, iż mimo wzrostu wysokości ścieżki, a co za tym idzie powierzchni przekroju czynnego, pogorszeniu ulega współczynnik kształtu oraz szerokość ścieżki. Opisana metoda wymaga dalszych badań, gdyż w przypadku udanej redukcji szerokości ścieżki srebrowej uzyskiwanej w procesie sitodruku, może być ciekawą alternatywą dla innych metod wytwarzania warstwy zarodkowej.

4. PODSUMOWANIE

W niniejszym artykule przedstawiono fragment tematyki związanej z wytwarzaniem kontaktów elektrycznych ogniw fotowoltaicznych. Biorąc pod uwagę fakt, że obecnie nadal najpopularniejszym typem ogniwa jest ogniwo bazujące na krzemie krystalicznym, którego kontakty metaliczne wykonuje się technikami grubowarstwowymi, skoncentrowano się nad wybranymi technikami z tego obszaru badawczego. Przedstawiono metody mogące być alternatywą dla sitodruku. Pokazano także wyniki prac prowadzonych w LF IMiM PAN. Przedstawiony materiał pokazuje, iż grubowarstwowe kontakty metaliczne przeżywają ciągły rozwój i nadal znajdują się w centrum zainteresowań badawczych wielu ośrodków.

LITERATURA

1. EPIA, Global Market Outlook for Photovoltaics 2013-2017, 2013.
2. <http://pvinsights.com>.
3. Beaucarne G., Schubert G., Hoonstra J., Horzel J., Glunz S.W.: Summary of the Third Workshop on Metallization for Crystalline Silicon Solar Cells. Energy Procedia, 21, 2-13, 2012.
4. Buzby D., Dobie A.: Fine Line Screen Printing of Thick Film Pastes on Silicon Solar Cells, White Papers and Articles, Heraeus, 15.02.2011.
5. Erath D., Filipovic A., Retzlaff M., Goetz A.K., Clement F., Biro D., Preu R.: Advanced Screen Printing Technique for High Definition Front Side Metallization of Crystalline Silicon Solar. Solar Energy Materials & Solar Cells, 94, 57-61, 2010.
6. Glunz S.W., Aleman M., Bartsch J., Bay N., Bayer K., Bergander R., Filipovic A., Greil S., Grohe A., Hörteis M., Knorz A., Menkö M., Mettel A., Pysch D., Radtke V., Richter P., Rudolph D., Rublach T., Schetter C., Schmidt D., Schulz O., Woehl R.: Progress In Advanced Metallization Technology at Fraunhofer ISE, Photovoltaic Specialists Conference, 2008. PVSC '08. 33rd IEEE, 1-4, 11-16 May 2008.
7. Hörteis M., Metce A., Richter P.L., Fidorra F., Glunz S.W.: Further Progress in Metal Aerosol Jet Printing for Front Side Metallization of Silicon Solar Cells, 22nd European photovoltaic Solar Energy Conference (Milan, Italy), pp. 1039-1042, 2007.
8. Wehkamp N., Fell A., Bartsch J., Granek F.: Laser Chemical Metal Deposition for Silicon Solar Cell Metallization, Energy Procedia, 21, 47-57, 2012.
9. Drabczyk K., Panek P.: Influence of Screen Printing Parameters on the Front Metallic Electrodes Geometry of Solar Cells, Circuit World, vol. 40 iss. 1, 2014.
10. Drabczyk K., Socha R., Panek P., Modarski G.: Electrodeposition of Thin Metallic Layer for Solar Cell Electrodes, Soldering & Surface Mount Technology, vol. 26, iss. 1, 2014.

Rękopis dostarczono dnia 12.03.2014 r.

METAL CONTACTS OF CRYSTALLINE SILICON SOLAR CELLS

Kazimierz DRABCZYK

ABSTRACT *This paper presents selected techniques for the front side metallization of crystalline silicon solar cells. In industrial production the most commonly applied type of solar cells is crystalline silicon solar cell. Therefore, in the article main directions of research of thick-film metallization technology like: screen printing techniques, aerosol jetting and laser*

chemical metal deposition are presented. The presented printing experiments have been carried out on the semi automated pilot line at the Photovoltaic Laboratory of Institute of Metallurgy and Materials Science of Polish Academy of Sciences.

Keywords: *Silicon solar cell, metallization, screen printing*



Dr inż. Kazimierz DRABCZYK – Od 1998 roku zatrudniony w Instytucie Elektroniki Politechniki Śląskiej w Gliwicach na stanowisku asystenta, następnie od 2004 roku adiunkta, a od 2007 roku zatrudniony na stanowisku adiunkta w Instytucie Metalurgii i Inżynierii Materiałowej PAN (Laboratorium Fotowoltaiczne). W swoim dorobku naukowym posiada łącznie 72 publikacje naukowe, w tym 22 prace w recenzowanych czasopismach naukowych (11 pozycji ujętych przez Institute for Scientific Information w Filadelfii), 43 artykuły konferencyjne, współautor dwóch skryptów uczelnianych i jednej monografii w języku angielskim. Obszar prowadzonych badań naukowych to nowoczesne technologie kontaktów metalicznych ogniw fotowoltaicznych, metody charakterystyki materiałów półprzewodnikowych stosowanych w fotowoltaice ze szczególnym uwzględnieniem pomiarów spektralnych, procesy i mechanizmy dyfuzji domieszek w krzemie, nowe technologie stosowane w przemyśle fotowoltaicznym, odnawialne źródła energii.

