SOKÓŁ SESJA OKOLICZNOŚCIOWA
PSKN zeszyt nr 30/2014
Gliwice 2014
INSTYTUT MATERIAŁÓW INŻYNIERSKICH I BIOMEDYCZNYCH
POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ W GLIWICACH
PRACE STUDENCKICH KÓŁ NAUKOWYCH

Nanoszenie elektrod ogniwa słonecznego metodą sitodruku i ich wypalanie
Screen-printing deposition of electrodes and its firing

M. Prokopiuk vel Prokopowicz[a], A. Tomiczek[b], A. Drygała[c]

[a] Doktorantka Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Studenckie Koło Naukowe Nanotechnologii i Materiałów Funkcjonalnych
email: marzena.prokopiukvelprokopowicz@polsl.pl

[b] Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Zakład Technologii Procesów Materiałowych, Zarządzania i Technik Komputerowych w Materiałoznawstwie
email: anna.tomiczek@polsl.pl

[c] Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Zakład Technologii Procesów Materiałowych, Zarządzania i Technik Komputerowych w Materiałoznawstwie
email: aleksandra.drygala@polsl.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono wykorzystanie sitodrukarek do nanoszenia elektrod ogniwa słonecznego oraz pieca taśmowego do ich wypalania.

Abstract: The paper describes the possibility of using screen-printing machines for forming solar cells electrodes and belt furnace for its firing.

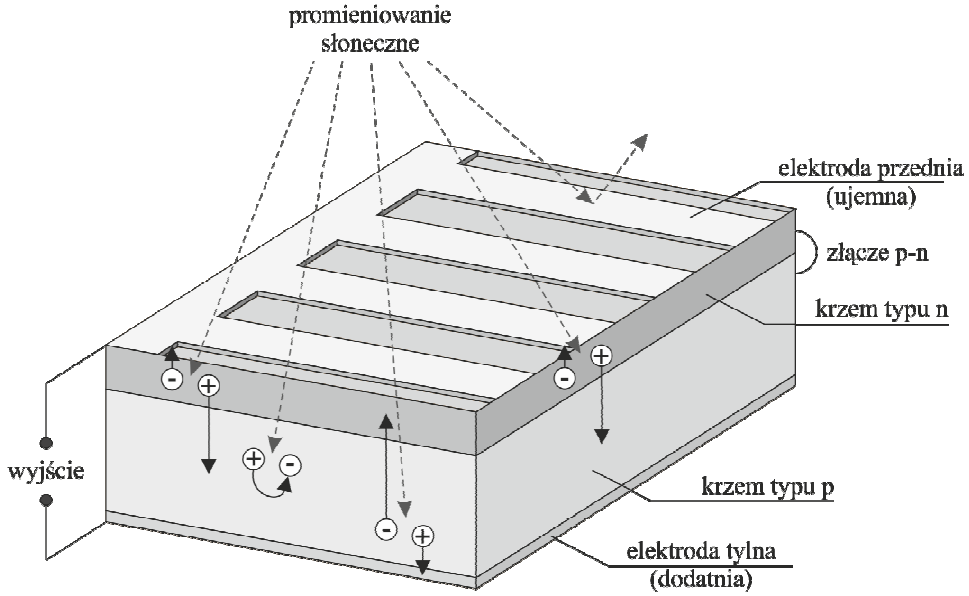
Słowa kluczowe: ogniwo słoneczne, sitodruk, piec taśmowy, wypalanie elektrod

1. WSTĘP

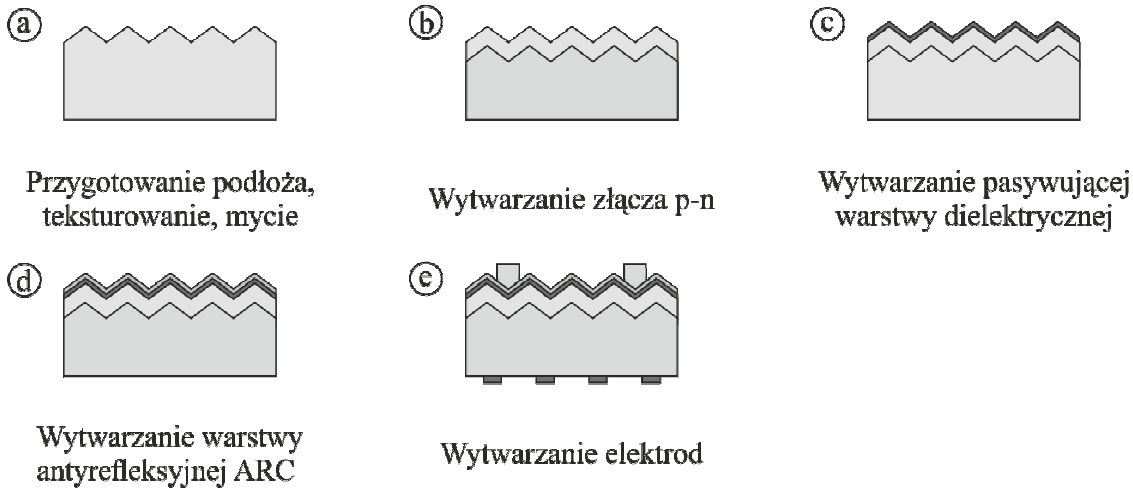
Ogniwo słoneczne (fotowoltaiczne) jest elementem półprzewodnikowym, umożliwiającym bezpośrednią konwersję energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną. Klasyczne krzemowe ogniwo słoneczne składa się z (rys. 1) [1,2]:

- półprzewodnika typu n,
- półprzewodnika typu p,
- złącza p-n,
- warstwy pasywującej,
- warstwy antyrefleksyjnej pokrywającej przednią powierzchnię ogniwa,
- elektrody przedniej i tylnej.

W wyniku dyfuzji elektronów z obszaru n do p i dziur z obszaru p do n powstaje ładunek przestrzenny, który wytwarza wewnętrzne pole elektryczne w złączu. Jeżeli złącze zostanie oświetlone, fotony generują pary nośników ładunku elektrycznego: dziury i elektrony.



Rysunek 1. Schemat budowy i zasada działania ogniwa słonecznego [1]
Figure 1. Construction of solar cell and its operating mode [1]



Rysunek 2. Technologia wytwarzania krzemowego ogniwa słonecznego z wykorzystaniem metody sitodruku [7]
Figure 2. Technology using screen-printing methods to produce silicon solar cell [7]

Wytwarzanie krzemowych ogniw słonecznych składa się z kilku etapów (rys. 2) [1,3-5]:

- przygotowanie powierzchni (odłuszczanie, czyszczenie, polerowanie i teksturowanie),
- wytworzenie złącza p-n,

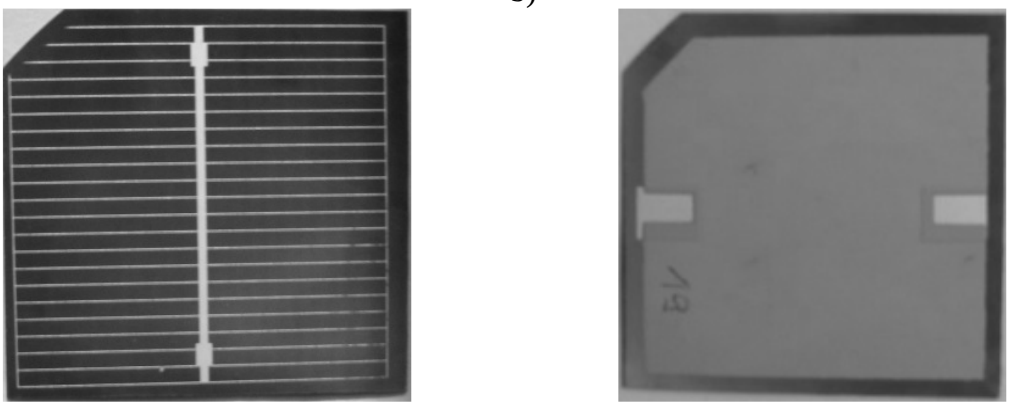
- pasywacja powierzchni ogniwa,
- naniesienie warstwy antyrefleksyjnej,
- naniesienie i wypalenie elektrody przedniej i tylnej.
-

2. NANOSZENIE ELEKTROD OGNIWA SŁONECZNEGO METODĄ SITODRUKU

Naniesienie przedniej i tylnej elektrody (metalizacja) odbywa się z wykorzystaniem metody sitodruku SP (ang. Screen Printing), naparowania w próżni (ang. Vapour Deposition), chemicznego nakładania lub selektywnego spiekania laserowego SLS (ang. Selective Laser Sintering), przy czym najtańszą z nich (i najczęściej stosowaną) jest metoda sitodruku [1,8].

Tylna elektroda (rys. 3a) pokrywa całą powierzchnię ogniwa słonecznego, a elektroda przednia (rys. 3b) nadrukowywana jest w postaci cienkich ścieżek połączonych elektrodą zbiorczą tak, aby jak najwięcej promieniowania słonecznego docierało do obszaru złącza. Szerokość i rozstaw ścieżek jest kompromisem między minimalizacją składowej rezystancji kontaktu elektrody przedniej z emiterem a polem zacienienia czynnej powierzchni ogniwa fotowoltaicznego [1,2,9].

a) b)



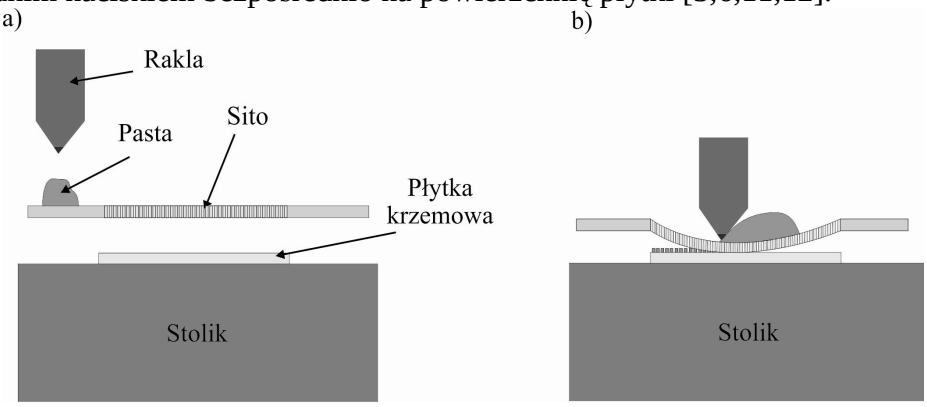
Rysunek 3. Ogniwo słoneczne na bazie krzemu monokrystalicznego z naniesioną elektrodą: a) przednią; b) tylną [5]
Figure 3. Monocrystalline silicon solar cell with electrode: a) front; b) back [5]

Elektrody powinny być wykonane z materiałów o małym oporze elektrycznym i dobrych własnościach mechanicznych - wykorzystuje się do tego celu pasty srebrne, aluminiowe lub miedziane [3,8].

Nadruk kontaktów elektrycznych na krzemowe ogniwa fotowoltaiczne najczęściej odbywa się przy użyciu sitodrukarek, które mogą być również wykorzystywane do druku napisów i rysunków na płaskich lub walcowych powierzchniach (np. długopisach, kubkach, tłokach, tkaninach, opakowaniach itp.). Sitodruk wykorzystuje się również w mikroelektronice do wytwarzania układów scalonych - jest to jedyna metoda umożliwiająca zadruk wielu rodzajów podłoży, o różnej fakturze i kształcie [6,10].

W metodzie SP druk powstaje w wyniku przeciskania farby przez siatkę z określonym wzorem, który w ten sposób jest trwale nanoszony na podłoże. Precyzja i dokładność druku sitowego jest zależna od gęstości użytej siatki [11].

W przypadku nadrukowywania elektrod na ogniwo słoneczne, odległość sita od górnej części płytki musi być ściśle określona. Na sito nakłada się pastę, która jest rozprowadzana tzw. raklą rozprowadzającą po całej powierzchni siatki (rys. 4). Przesuwająca się po niej druga rakla, tzw. dociskająca powoduje przeciskanie pasty przez wolne oczka siatki z odpowiednim naciskiem bezpośrednio na powierzchnię płytki [3,6,11,12].



Rysunek 4. Zasada działania sitodruku [6]
Figure 4. Screen-printing method principle of operation [6]

Tablica 1. Dane techniczne sitodrukarki MS300FRO [13]
Table 1. Technical data of MS300FRO screen-printing machine [13]

Maksymalny rozmiar sita, mm	400x570
Maksymalny obszar druku, mm	owal 280x250 okrąg φ90x250 płaski 290x260
Maksymalna średnica/wysokość przedmiotu, mm	300
Maksymalny kąt/nachylenie, °	7
Szybkość druku, szt/h	1300
Zasilanie, V	110/220 (50/60 Hz)
Waga netto, kg	136

Sitodrukarka MS300FRO (rys. 5a) jest półautomatyczną uniwersalną maszyną przeznaczoną do druku na elementach płaskich, okrągłych i owalnych, kwadratowych. Posiada panel kontrolny z wyświetlaczem pokazujący wszystkie parametry, łatwy w obsłudze i programowaniu. Istnieje ponadto możliwość pełnej regulacji ustawień stołu, sita i przedmiotu (przód/tył, prawo/lewo, góra/dół, kąty).

Tablica 2. Dane techniczne sitodrukarki S5070 [13]
Table 2. Technical data of S5070 screen-printing machine [13]

Maksymalny rozmiar sita, mm	800÷1100
Maksymalny obszar druku, mm	500÷700
Rozmiar stołu, mm	600÷900
Przesuw, mm	600
Maksymalna wysokość przedmiotu, mm	150
Szybkość druku, szt/h	1100
Zasilanie, V	110/220 (50/60 Hz)
Waga netto, kg	300

a) b)

Rysunek 5. Sitodrukarka typu: a) MS300FRO; b) S5070
Figure 5. Screen-printing machine: a) MS300FRO; b) S5070

Laboratorium Instytutu Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej wyposażone jest w sitodrukarkę MS300FRO oraz typu S5070 firmy PrintingMachine. Ich dane techniczne zestawiono w tablicach 1 i 2.

Z kolei sitodrukarka S5070 (rys. 5b) jest maszyną przeznaczoną do druku na elementach płaskich (folia, papier, lakierowanie). Posiada ruchome sito oraz automatyczny i równomierny ruch rakli zapewniający równy docisk i precyzyjne drukowanie, a ponadto panel kontrolny z wyświetlaczem, pełną regulację w osiach X, Y, Z, kąty, ręczny załadunek/rozładunek i stół z podsysem.

3. WYPALANIE ELEKTROD OGNIWA SŁONECZNEGO

Po naniesieniu pasty, tj. nadrukowaniu warstw, płytki krzemowe są suszone, a ich ostateczne formowanie następuje w piecu po wypalaniu. W laboratorium Instytutu Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych Politechniki Śląskiej pasty wypalane są w piecu taśmowym PFO-200 firmy Czylok (rys. 6), którego wybrane dane techniczne zestawiono w tablicy 3.

Rysunek 6. Piec PFO-200
Figure 6. PFO-200 type furnace

Na reakcje zachodzące podczas wypalania warstw przewodzących ma wpływ temperatura i czas wypalania oraz atmosfera w piecu - w związku z tym istotne jest zapewnienie odpowiedniej kontroli wymienionych czynników w trakcie procesu technologicznego.

Tablica 3. Dane techniczne pieca PFO-200 [14]
Table 3. Technical data of PFO-200 furnace [14]

Rodzaj pieca	taśmowy
Zakres regulacji temperatury, °C	20÷1000
Maksymalna temperatura pracy, °C	1000
Liczba stref grzejnych	4
Długość strefy grzejnej, mm	500
Długość strefy chłodzenia, mm	505
Rodzaj chłodzenia strefy	woda i powietrze
Moc pieca, kW	12.9

Piec PFO-200 podzielony jest na dwie części, z których pierwsza umożliwia grzanie, a druga chłodzenie. Komora modułu grzewczego podzielona jest na cztery strefy, a w każdej z nich temperatura może być ustawiona niezależnie od pozostałych. Profil temperatury wypalania elektrod ogniwa słonecznego musi być ustawiony tak, aby pasta srebrna przetopiła się przez warstwę antyrefleksyjną i wytworzyła kontakt z górną warstwą krzemu typu *n*, ale nie wdyfundowała w obszar ładunku przestrzennego. W przypadku tylnej elektrody aluminium dyfunduje na głębokość kilku mikrometrów do krzemu, co w konsekwencji powoduje wytworzenie lokalnej warstwy o przewodnictwie typu *p*+ [2,4,14].

Czas wypalania regulowany jest przez prędkość przesuwu taśmy. Konstrukcja pieca umożliwia wykonanie obróbki cieplnej w atmosferze neutralnej lub ochronnej.

Ogniwa z naniesionymi kontaktami elektrycznymi są testowane i wykorzystywane do złożenia modułów i paneli fotowoltaicznych, które z kolei są bezpośrednio wykorzystywane do przetwarzania energii promieniowania słonecznego w elektryczną.

4. PODSUMOWANIE

Właściwe zaprojektowanie kształtu i rozmiaru elektrody przedniej jest bardzo istotne ze względu na minimalizację strat elektrycznych i optycznych ogniwa fotowoltaicznego. Z jednej strony nie może ona w znacznym stopniu zakrywać czynnej powierzchni ogniwa słonecznego, a z drugiej - musi zapewniać właściwe odprowadzenie ładunku elektrycznego [3,6,15,16]. Wykorzystanie metody sitodruku do nanoszenia elektrod i wypalenie ich w piecu o odpowiednim profilu temperatury pozwala na otrzymanie wysokosprawnych ogniw fotowoltaicznych.

LITERATURA

1. E. Klugmann-Radziemska, Fotowoltaika w teorii i praktyce, Wydawnictwo BTC, Legionowo, 2010.
2. R. Ciach, J. Żelazny, Materiały i technologie fotowoltaiczne, Fundacja Rozwoju Nauk Materiałowych, Kraków, 2005.
3. L.A. Dobrzański, M. Musztyfaga, A. Drygała, P. Panek, K. Drabczyk, P. Zięba, Wytwarzanie ogniw fotowoltaicznych z wykorzystaniem metody sitodruku, I Krajowa Konferencja Fotowoltaiki, Krynica-Zdrój 2009, CD, 1-9.
4. P. Panek, M. Lipiński, E. Bełtowska-Lehman, K. Drabczyk, R. Ciach, Industrial technology of multicrystalline silicon solar cells, Opto-Electronic Review 11/4 (2003) 269-275.
5. M. Macek, Własności i technologia wytwarzania krzemu oraz krzemowych ogniw fotowoltaicznych, Politechnika Śląska, Gliwice, 2009. Praca magisterska (niepublikowana) - promotor: prof. dr hab. inż. Z. Rdzawski.
6. L.A. Dobrzański, M. Musztyfaga, A. Drygała, P. Panek, Porównanie struktury i właściwości elektrycznych przednich elektrod ogniw słonecznych wypalanych w piecu taśmowym i selektywnie spiekanych laserowo, Elektronika. Konstrukcje. Technologie. Zastosowania 4 (2011) 50-52.
7. E. Wróbel, N. Waczyńska, K. Drabczyk, W. Filipowski, Badanie właściwości cienkich warstw pasywujących z SiO_2 w strukturze ogniwa fotowoltaicznego, Elektronika. Konstrukcje. Technologie. Zastosowania 4 (2011) 55-57.
8. E. Klugmann, E. Klugmann-Radziemska, Alternatywne źródła energii. Energia fotowoltaiczna, Ekonomia i Środowisko, Białystok, 1999.
9. T. Markvart, L. Castaner, Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications, Elsevier, Oxford, 2006.
10. Strona internetowa: http://globenergia.pl/fotowoltaika.
11. A. Krejča, Techniki sztuk graficznych: podręcznik metod warsztatowych i historii grafiki artystycznej, Wydawnictwa Artystyczne i Filmowe, Warszawa, 1984.
12. A. Jurkiewicz, Podręcznik metod grafiki artystycznej, Arkady, Warszawa, 1975.
13. Materiały producenta „PrintingMachine" (www.printingmachine.pl).
14. Materiały firmy „Czylok" (www.czylok.com.pl).

15. J. Hennel, Podstawy elektroniki półprzewodnikowej, WNT, Warszawa, 2003.
16. E. Wiśniewski, Energia słoneczna. Przetwarzanie i wytwarzanie energii promieniowania słonecznego, Fundacja Ekologiczna SILESIA, Katowice, 1999.