

## Analiza metod teksturowania powierzchni krzemu krystalicznego stosowanego w fotowoltaice

Monika Gruszecka, Jerzy Grudziński, Andrzej Stępniewski

Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

**Streszczenie.** W pracy przeprowadzono analizę metod teksturowania powierzchni płytek krzemowych stosowanych w ogniwach fotowoltaicznych. Omówiono metody trawienia płytek krzemu monokrystalicznego w roztworach alkalicznych, metody trawienia krzemu polikrystalicznego w środowisku kwasowym, obróbkę laserową i obróbki mieszane wykorzystujące laser i trawienie chemiczne. Na podstawie opublikowanych wyników badań absorpcji promieniowania świetlnego oceniono poszczególne technologie pod kątem ich praktycznej przydatności do budowy wysokosprawnych paneli słonecznych. **Słowa kluczowe:** ogniwa słoneczne, laserowe teksturowanie krzemu, fotowoltaika.

### WSTĘP

Ogniwa słoneczne wykorzystują efekt fotowoltaiczny do konwersji energii świetlnej na elektryczną. W XX wieku były rzadko wykorzystywane ze względu na dużą cenę i małą sprawność. Obecnie, dzięki nowym technologiom wytwarzania i teksturowania płytek krzemowych zmniejszono koszty produkcji. Nowe metody teksturowania umożliwiły zwiększenie liczby „wyłapywanych” fotonów jak również wykorzystywanie energii fotonów odbijanych na chropowatościach powierzchni płytek. Panele słoneczne są wykorzystywane w energetyce przemysłowej wytwarzającej ponad 100 tys. MW. Ponad 90% ogniw fotowoltaicznych produkowanych jest z krzemu. Stosowany jest krzem krystaliczny lub amorficzny, jak również krzem monokrystaliczny pokryty krzemem amorficznym. Ogniwa z krzemu monokrystalicznego są droższe a ich sprawność nie przekracza 25%, natomiast ogniwa z krzemu polikrystalicznego są tańsze, lecz ich sprawność wynosi ok. 20% [4, 12].

### CEL I ZAKRES PRACY

Celem pracy jest porównanie wyników badań ogniw zbudowanych z płytek krzemowych teksturowanych odmiennymi

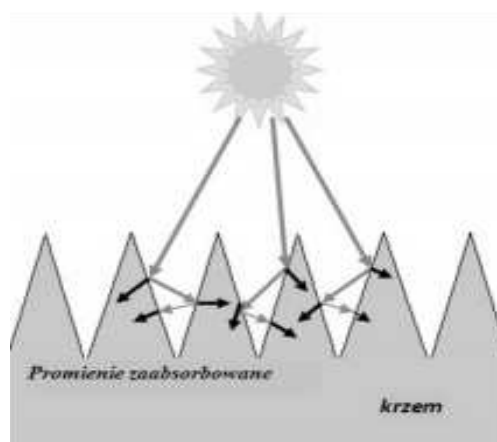
metodami i wskazanie metody najkorzystniejszej pod względem uzyskiwanej sprawności i kosztów stosowanej technologii.

### METODY ZMNIEJSZENIA WARTOŚCI WSPÓŁCZYNNIKA ODBICIA ŚWIATŁA OD POWIERZCHNI OGNIWA

Spośród wszystkich fotonów padających na powierzchnię półprzewodnika część z nich ulega odbiciu, część zostaje zaabsorbowana, a część przechodzi na wylot przez cienkie płytki krzemu nie biorąc udziału w konwersji energii (rys. 1).

W ogólnym przypadku, zależność pomiędzy współczynnikiem absorpcji (pochłaniania)  $A$ , współczynnikiem refleksyjności (odbicia)  $R$  i współczynnikiem transmisyjności (przepuszczania)  $T$  jest następująca:

$$A + R + T = 1 \quad (1)$$



**Rys. 1.** Schemat wielokrotnienia absorpcji fotonów przez teksturovaną powierzchnię ogniwa

**Fig. 1.** Scheme of multiply photon absorption by the textured cell surface

W przetwarzaniu energii udział biorą tylko fotony absorbowane, które „wybijają” elektrony z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa. „Wybicie” elektronu następuje, gdy energia zaabsorbowanego fotonu  $E_{ph}$  będzie większa od energii odpowiadającej szerokości przerwy energetycznej półprzewodnika  $E_g$ :

$$E_{ph} = h \cdot \nu > E_g, \quad (2)$$

gdzie:

$c$  – prędkość światła [m/s],

$h$  – stała Plancka [J·s],

$\nu$  – częstość drgań promieniowania elektromagnetycznego dla danej długości fali świetlnej  $\lambda$  [Hz],

przy czym:

$$\nu = \frac{c}{\lambda}. \quad (3)$$

Jednym z najważniejszych parametrów mających wpływ na sprawność konwersji fotowoltaicznej jest współczynnik odbicia światła od powierzchni ogniwa słonecznego. Dla celów badawczych zostało sformułowane pojęcie efektywnego współczynnika odbicia  $R_{eff}$ :

$$R_{eff} = \frac{\int_{400}^{1000} R(\lambda) \cdot N_{ph}(\lambda) d\lambda}{\int_{400}^{1000} N_{ph} d\lambda}, \quad (4)$$

gdzie:

$R(\lambda)$  – współczynnik odbicia światła – stosunek natężenia fali odbitej do padającej,

$N_{ph}(\lambda)$  – strumień fotonów widma słonecznego AM1.5 w funkcji długości fali światła ( $\lambda$ ).

Zakres całkowania jest umowny, zwykle przyjmowany w przedziale  $\lambda = 400$ -1000 nm, dla którego ogniwo posiada najlepsze właściwości absorpcyjne, a  $R(\lambda)$  przyjmuje stałą wartość.

W celu obniżenia strat związanych z odbiciem światła od powierzchni ogniwa, stosowane są warstwy antyrefleksyjne lub płytki teksturowane. Teksturowanie powierzchni umożliwia wielokrotne absorbowanie pojedynczego fotonu.

## METODY TEKSTUROWANIA POWIERZCHNI KRZEMU KRystalicznego

Mechaniczne metody teksturowania powierzchni płytek z polikrystalicznego krzemu, np. mechaniczną piłą diamentową, czy też trawienie w plaźmie, obniżają efektywny współczynnik odbicia, lecz są mało wydajne. W wyniku anizotropowego trawienia w roztworach alkalicznych, np. KOH, NaOH (Tabela 1) płytek z krzemu monokrystalicznego o orientacji krystalograficznej wynoszącej 100, powstaje tekstura w postaci ostrosłupów o różnych kształtach i wymiarach podstaw. Analogiczne trawienie płytek z krzemu po-

**Tabela 1.** Porównanie współczynników odbicia dla różnych metod teksturowania powierzchni krzemu krystalicznego  
**Table 1.** Comparison of the reflection coefficients for the different methods of the surface texturing of crystalline silicon

Nr	Materiał	Metoda/roztwór/ ośrodek	Współczynnik odbicia w %	Źródło
1	Krzem czarny	MAE / Pd / PdCl <sub>2</sub> trawienie w: HF:H <sub>2</sub> O:H <sub>2</sub> O lub HF:HNO <sub>3</sub> :H <sub>2</sub> O	10,4	Lipiński 2011 [17]
2	Krzem monokrystaliczny	trawienie anizotropowe/ NaOH	12-14	Vazsonyi i in. 1999 [23]
3	Krzem monokrystaliczny	trawienie w KOH-IPA	3	Dimitrov i in. 2013 [2]
4	Krzem polikrystaliczny	RIE – reaktywne trawienie jonowe / CHF <sub>3</sub> / SF <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	dla wzniesień – 5,6 dla rowków – 7,9	Winderbaum i in. 2004 [22]
5	Krzem polikrystaliczny	trawienie NaOH lub KOH z maskowaniem fotolitograficznym	20	Shirasawa i in. 1994 [20]
6	Krzem polikrystaliczny	trawienie NaOH lub KOH bez maskowania	24	Lipiński i in. 2001 [15]
7	Krzem polikrystaliczny	mechaniczna piła diamentową	5	Szlufcik i in. 1994 [2] Fath i in. 1994 [10]
8	Krzem polikrystaliczny	trawienie w roztworach kwasowych na bazie HF	9	Ludemann i in. 2000 [3]
9	Krzem polikrystaliczny	trawienie w plaźmie	3	Damiani i in. 2000 [3]
10	Krzem polikrystaliczny	trawienie w plaźmie z dodatkiem trawienia w roztworach KOH	21	Damiani i in. 2000 [3]
11	Krzem polikrystaliczny	trawienie w roztworach HNO <sub>3</sub> -HF z maskowaniem fotolitograficznym	3	Zhao i in. 1998 [26]
12	Krzem multikrystaliczny	trawienie w środowisku zasadowym / KOH, NaOH	9	Macdonald i in. 2004 [18]
13	Krzem multikrystaliczny	trawienie w środowisku kwasowym/ HF, HNO <sub>3</sub>	8	Macdonald i in. 2004 [18]
14	Krzem multikrystaliczny	trawienie w środowisku kwasowym: H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , NaNO <sub>2</sub> , HF, HNO <sub>3</sub>	9,8	Park i Kim 2003 [19]
15	Krzem multikrystaliczny	teksturyzacja laserowa	3	Zuev i in. 2012 [27]

likrystalicznego nie daje tak dobrych rezultatów ze względu na różną orientację ziaren krystalitów.

Obecnie intensywnie badane są chemiczne metody teksturowania krzemu multikrystalicznego w roztworach kwaśnych. Trawienie w roztworze  $\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}$  w stosunku objętościowym 10:1:1 usuwa warstwę zdefektowaną i teksturuje powierzchnię. Wadą metody jest powstawanie warstwy nanoporowatej, którą należy usunąć w roztworze  $\text{KOH}$ . Ponadto roztwór trawiący szybko się zanieczyszcza. Stosuje się także teksturowanie w roztworze  $\text{NOHSO}_4:\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$ . Trawienie przebiega wolniej, co umożliwia lepszą kontrolę przebiegu procesu. Dodatkowo neutralizowane są tlenki azotu w wyniku redukcji z  $\text{NO}^+$  do  $\text{N}_2\text{O}$  [13].

Anizotropowa teksturyzacja w roztworze  $\text{NaOH}:\text{NaOCl}$  stosowana jest do płytek krzemowych typu „as cut” z mikropęknięciami wprowadzonymi podczas cięcia bloków krzemowych. W przypadku taśm polikrystalicznych nie mających defektów, metoda daje złe wyniki [16, 17].

Nowa metoda teksturowania chemicznego przy wykorzystaniu katalitycznego metalu MAE (Metal-Assisted Chemical Etching) umożliwia otrzymanie czarnego krzemu z bardzo małym współczynnikiem odbicia światła. Na powierzchni krzemu odkładane są metaliczne klastery ( $\text{Au}$ ,  $\text{Ag}$ ,  $\text{Pt}$ ,  $\text{Pd}$ ), które pełnią rolę katalizatorów trawienia chemicznego w roztworach zawierających kwas fluorowodorowy i utleniacz, np.  $\text{HNO}_3$  lub wodę utlenioną. Lipiński [2010] zastosował pallad jako katalizator, który nadkładał na powierzchnię płytek krzemowych przez ich zanurzenie w wodnym roztworze chlorku palladu  $\text{PdCl}_2$  przez 60 s. Gęstość klastery wynosiła  $N_{pd} \approx 6 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$ , wysokość 14 nm, a średnica 38 nm. W wyniku trawienia płytek pokrytych palladem w roztworach  $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$  lub  $\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}$  powstaje krzem porowaty. Roztwory  $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$  nie trawią powierzchni krzemu, gdy nie jest ona pokryta cząstkami palladu, a roztwory  $\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}$  trawią go szybciej. Kolejne trawienie w roztworze  $\text{KOH}$  lub  $\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}$  powoduje teksturowanie powierzchni o współczynniku odbicia zależnym od roztworu trawiącego i czasu trawienia. Powstaje tekstura powierzchni w postaci jamek o wielkości 0,1-1  $\mu\text{m}$ .

Autorzy [13, 16, 17] wyznaczyli efektywne współczynniki odbicia  $R_{\text{eff}}$  płytek z krzemem porowatym dla czterech wariantów roztworów trawiących kwaśnych i zasadowych w czasie 30 lub 60 s. Okazało się, że wartości  $R_{\text{eff}}$  dla wszystkich badanych próbek są mniejsze, niż dla próbek trawionych w roztworze kwasowym ( $R_{\text{eff}} = 22,6\%$ ) lub dla powierzchni bez tekstury ( $R_{\text{eff}} = 29,2\%$ ).

Dimitrov i inni [2] poddali teksturowaniu powierzchnię krzemu monokrystalicznego w roztworze  $\text{KOH-IPA}$  w temperaturze  $80^\circ\text{C}$  przez 45 minut. W wyniku teksturowania, na powierzchni powstały ostrosłupy o rozmiarach rzędu mikrometrów. Po teksturowaniu powierzchnia krzemu została oczyszczona w roztworze  $\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$  i poddana działaniu rozcieńczonego  $\text{HF}$ . Następnie wytworzono nanopiramidy bezpośrednio na uprzednio otrzymanej teksturze. Nanotekstura została wytworzona w dwuetapowym trawieniu kwaśnym roztworem wodnym  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$  i  $\text{AgNO}_3$  przez 6 minut, a następnie w roztworze  $\text{HF}$  i  $\text{H}_2\text{O}$  przez 2 minuty, oba w temperaturze pokojowej. Dla ogniw sł-

necznych wykonanych z krzemu, na powierzchni którego została wykonana hierarchiczna tekstura dla długości fali 300-900 nm, współczynnik odbicia wynosi 3% i maleje dla mniejszych długości fal. Tworzenie na powierzchni krzemu hierarchicznej tekstury o rozmiarach mikrometrów i nanometrów zapewnia polepszenie właściwości antyrefleksyjnych, poprawia niezawodność i sprawność ogniw.

Efektywne teksturowanie powierzchni krzemu polikrystalicznego metodami chemicznymi uniemożliwia różną orientacją krystalograficzną ziaren. Po teksturyzacji mechanicznej powierzchni piłą diamentową otrzymano współczynnik odbicia o wartości 3%. Alternatywną metodą teksturowania powierzchni krzemu poli- i multikrystalicznego jest mikroobróbka laserowa. Zalety tej metody to: selektywność, bezkontaktowość, precyzyjność i wydajność. Dobór parametrów pracy lasera wpływa na kształt otrzymanych tekstur oraz na stan warstwy wierzchniej. W zależności od ciśnienia użytego gazu osłonowego i gęstości mocy lasera zmieniają się kształt i wymiary otrzymanych tekstur [25]. Wraz ze spadkiem prędkości posuwu wiązki lasera zwiększa się głębokość powstałych rowków, a szerokość nie ulega istotnej zmianie [9, 5]. Stosując większą moc lasera i większą liczbę impulsów, można otrzymać struktury w postaci perełek, przy mniejszych wartościach struktury w kształcie fal [11]. Współczynnik odbicia jest jednym z kilku najważniejszych parametrów fotoogniw. W wyniku pracy lasera następuje zwiększenie chropowatości powierzchni i zmniejszenie współczynnika odbicia. Obecność uszkodzonej warstwy wierzchniej i zanieczyszczeń zgromadzonych w zagłębieniach pogarsza sprawność i parametry elektryczne.

Porównanie wyników badań nie jest łatwym zadaniem, ponieważ Autorzy stosują różne metody przygotowania i wycinania próbek z wlewka, różne lasery i parametry ich pracy oraz różne odczynniki trawiące. Nie są też ujednolicone nadające się do porównań parametry fotoogniw.

Do oceny efektywności konwersji energii słonecznej na elektryczną w literaturze specjalistycznej wykorzystywane są różne kryteria. Wyznaczane są współczynnik odbicia, współczynniki absorpcji, efektywne współczynniki odbicia, ich wartości mierzone są na różnych etapach wytwarzania płytek krzemowych, tj. bezpośrednio po teksturowaniu laserowym lub po usunięciu warstwy wierzchniej.

## LASEROWE TEKSTUROWANIE KRZEMU KRystalicznego

Geometria otrzymanych tekstur zależy od czasu oddziaływania i gęstości mocy wiązki  $q$ , wyrażonej zależnością:

$$q = \frac{4 \cdot P}{\pi \cdot d^2}, \quad (5)$$

przy czym:

$$d = \Theta_0 \cdot f_0, \quad (6)$$

$$\Theta_0 = 1,2 \cdot \frac{\lambda}{r}, \quad (7)$$

$P$  – moc lasera, [W],  
 $d$  – średnica plamki lasera, [mm],  
 $f_o$  – ogniskowa lasera, [mm],  
 $\Theta_o$  – stopień rozogniskowania,  
 $\lambda$  – długość fali promieniowania, dla lasera Nd:YAG,  $\lambda = 1,064 \mu\text{m}$ ,  
 $r$  – promień wiązki, [mm].

Czas ekspozycji, naświetlania  $t$  wg Antoszewskiego [2010]:

$$t = \frac{d}{V}, \quad (8)$$

gdzie:  $V$  – prędkość przesuwu wiązki [m/s].

Dobrzański i inni [4, 5] wykonywali rowki w powierzchni płytek z krzemu polikrystalicznego przy zastosowaniu maksymalnej mocy lasera w trybie pulsacyjnym. Na podstawie przeprowadzonych obserwacji topografii powierzchni płytek krzemu polikrystalicznego po teksturoowaniu laserowym stwierdzili, że na całej powierzchni znajduje się warstwa uszkodzonego materiału powstała w wyniku kondensacji fazy ciekło-gazowej występującej w trakcie obróbki laserowej, kształt rowków powstałych w wyniku teksturowania powierzchni jest nieregularny z wypływkami na brzegach, wytworzone zagłębienia są wtórnie zalane stopionym i nie w pełni odparowanym materiałem, obszary między wypływkami sąsiadnych rowków są pokryte zakrzepłym materiałem. Występują zniekształcone, wykrywalne krople krzemu tzw. napływy o wymiarach rzędu kilku mikrometrów.

Badano wpływ średnicy przesłony lasera na wymiary rowków. Stwierdzono, że ze względów technologicznych, odstęp między sąsiednimi rowkami powinny zawierać się w granicach 0,05 – 0,09 mm. Stosowanie mniejszych odstępów prowadzi do zalania rowków wytworzonych wcześniej, natomiast odstęp większe pozostawiają za duże powierzchnie nieobrobione [6].

Porównywano wartości efektywnych współczynników odbicia światła przez płytki z krzemu polikrystalicznego nieteksturowane, teksturowane laserowo i trawione w 20% roztworze KOH w temperaturze 80°C, następnie w 47% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:H<sub>2</sub>O, w 2% HCl i w 10% HF po teksturoowaniu laserowym. Tekstury miały kształt równoległych rowków lub siatki. Z przeprowadzonych eksperymentów wynika, że najgorsze parametry elektryczne mają ogniwa słoneczne wykonane z krzemu polikrystalicznego po laserowym teksturoowaniu. Zastosowanie trawienia chemicznego po teksturoowaniu, znacznie polepsza parametry ogniwa. Najlepsze właściwości fotowoltaiczne mają ogniwa wykonane z płytek

krzemu polikrystalicznego z teksturą równoległą (11,93%) i siatkową (12,67%) wykonaną laserowo i chemicznie trawione [7, 8].

Teksturowanie krzemu multikrystalicznego można wykonać laserem UV. Kwang-Ryul Kim i in. [14] trawili płytki pokryte warstwą SiN<sub>x</sub> o grubości 300 nm z V-rowkami o strukturze plastra miodu. Zastosowano trawienie 25% roztworem NaOH w temperaturze 40°C przez 4 minuty, następnie roztworem kwasu NaOH<sub>3</sub>:CH<sub>3</sub>COOH:HF w stosunku objętościowym 30:10:4 w temperaturze 20°C przez 4,5 minuty. Współczynnik odbicia od powierzchni teksturowanej bez trawienia wynosił 8,6% a trawionych 13,2%. Warstwa SiN<sub>x</sub> spowolniała trawienie celem zachowania ostrych krawędzi tekstury. Wraz ze zwiększeniem czasu trawienia próbki z warstwą SiN<sub>x</sub> współczynnik odbicia zwiększył się do 13,3% a dla próbek bez warstwy SiN<sub>x</sub> do 15,6%.

### WPLYW GEOMETRII TEKSTURY NA ABSORBCJĘ ŚWIETLNA

Porównano wyniki pomiarów kąta wierzchołkowego, kształtu i gęstości tekstur oraz wskaźników absorpcji z wynikami otrzymanymi z symulacji komputerowej [24]. Stwierdzono, że największy wpływ na współczynnik absorpcji ma gęstość tekstury, następnie wartość kąta wierzchołkowego rowków i ich kształt (Tabela 2). Od wartości kąta wierzchołkowego zależy krotność odbić promieni świetlnych długości fali  $\lambda = 640 \div 1080 \text{ nm}$ .

Tekstury o gęstszym ułożeniu rowków mają większe zdolności absorpcji promieni świetlnych. Najmniejszą absorpcję promieni świetlnych miały tekstury o kształcie stożka, a największą – ostrosłupa o podstawie trójkąta.

### WNIOSKI

Wyniki analizowanych badań potwierdziły przydatność teksturowania powierzchni krzemu jako metody poprawy sprawności konwersji fotowoltaicznej ogniwa słonecznych. Wśród opisywanych w literaturze technologii teksturowania mechanicznego, chemicznego i laserowego jako szczególnie perspektywiczną należy uznać ostatnią, pod warunkiem opracowania takiej technologii obróbki laserowej, która nie będzie nadmiernie uszkadzała warstwy wierzchniej krzemu. W wyniku precyzyjnego teksturowania laserowego powierzchni krzemu polikrystalicznego można otrzymać

**Tabela 2.** Zależność kąta wierzchołkowego od współczynnika absorpcji [24]

**Table 2.** Dependence of apex angle and reflectivity coefficient [24]

Nr	Krotność odbić	Współczynnik absorpcji	Figura	Kąt wierzchołkowy
1	jedenkrotne	jak dla wypolerowanego krzemu	stożek	>110°
2			ostrosłup o podstawie sześciokąta	>115°
3			ostrosłupa o podstawie prostokąta	>130°
4			ostrosłupa o podstawie trójkąta	>145°
5	wielokrotne	>0,9	ostrosłupa o podstawie sześciokąta	<70°
6			ostrosłupa o podstawie prostokąta	<85°
7			ostrosłupa o podstawie trójkąta	<85°

tekstury o ściśle określonym kształcie zbliżonym do optymalnego z punktu widzenia maksymalizacji pochłaniania promieniowania świetlnego. Najlepsze efekty uzyskano dokonując trawienia powierzchni uprzednio teksturowanych laserowo. Właściwości absorpcyjne zależą od zanieczyszczeń znajdujących się na jego powierzchni i wprowadzonych do struktury wewnętrznej w trakcie teksturowania oraz od gęstości, kąta wierzchołkowego i kształtu tekstur. Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury można stwierdzić, że większą wartość współczynnika odbicia mają ogniwa słoneczne zbudowane z płytek pokrytych rowkami o większej wartości ilorazu głębokości i szerokości. Najkorzystniejszym kształtem tekstury jest ostrosłup o podstawie trójkąta.

## LITERATURA

1. **Antoszewski B., 2010:** Warstwy powierzchniowe z teksturą kształtowaną wybranymi technologiami wiązkowymi oraz właściwości tribologiczne, Wyd. Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce.
2. **Dimitrov D.Z., Chen-Hsun Du., 2013:** Crystalline silicon solar cells with micro/nano texture, *Applied Surface Science*, Vol. 266, 1-4.
3. **Damiani B. M., Lüdemann R., Ruby D.S., Zaidi S.H., Rohatgi A., 2000:** Development of RIE-textured Silicon Solar Cells, *Proc. of the 28th IEEE Photovoltaic Specialist Conference*, 15-22 September, Anchorage, 371-374.
4. **Dobrzański L.A., Drygała A., 2011:** Wpływ obróbki laserowej na topografię powierzchni krzemu polikrystalicznego, *Elektronik – konstrukcje, technologie, zastosowanie*, Vol. 52, 53-54
5. **Dobrzański L.A., Drygała A., Konieczny J., Lełątko J., 2007:** Structure of laser treated multicrystalline silicon wafers, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 21, 69-72.
6. **Dobrzański L.A., Drygała A., 2010:** Laserowe teksturowanie powierzchni krzemu polikrystalicznego, *Elektronik – konstrukcje, technologie, zastosowanie*, Vol. 5, 57-59
7. **Dobrzański L.A., Drygała A., Panek P., Lipiński M., Zięba P., 2009:** Development of the laser method of multicrystalline silicon surface texturization, *Archives of Materials Science and Engineering*, Vol. 38, 5-11
8. **Dobrzański L.A., Drygała A., 2008:** Laser texturization in technology of multicrystalline silicon solar cells, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 29, 7-14.
9. **Dobrzański L.A., Drygała A., 2007:** Laser processing of multicrystalline silicon for texturization of solar cells. *Journal of Mat. Processing Technology*, Vol. 191, 228-231.
10. **Fath P., Willeke G., 1994:** Mechanical Wafer Engineering for High Efficiency Polycrystalline Silicon Solar Cells, *Proc. of the 12th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Vol. 1, 11-15 April, Amsterdam, 1037-1040.
11. **Halbwax M., Sarnet T., Delaporte Ph., Sentis M., Etienne H., Torregrosa F., Vervisch V., Perichaud I., Martinuzzi S., 2008:** Micro and nano-structuration of silicon by femtosecond laser. Application to silicon photovoltaic cells fabrication. *Thin Solid Films*, Vol. 516, 6791-6795.
12. **Jastrzębska G., 2013:** Ogniwa słoneczne. Budowa, technologia, zastosowanie, WKŁ, Warszawa.
13. **Kulesza G., Zięba P. 2011:** Chemiczna modyfikacja powierzchni krzemu krystalicznego do zastosowań w fotowoltaice. *Elektronik – konstrukcje, technologie, zastosowanie*, Vol. 52, 70-73.
14. **Kwang-Ryul K., Tae-Hoon K., Hyun-Ae P., Sun-Yong K., Sung-Hak Ch., Junsin Y., Byoung-Deog Ch., 2013:** UV laser direct texturing for high efficiency multicrystalline silicon solar cell. *Applied Surface Science* Vol. 264, 404-409.
15. **Lipiński M., Panek P., Beltowska E., Yerokhov V., 2001:** Investigation of Macroporous Layer by Chemical Etching for Silicon Solar Cell Manufacturing. *Proc. of the 17th European Photovoltaic Solar Energy Conf.*, 22-26 October, Munich, 1786-1788.
16. **Lipiński M., Cichoszewski J., 2010:** Tekstutowanie krzemu metodą trawienia chemicznego ze wspomaganie katalizatora metalicznego w zastosowaniu dla ogniwa słonecznych, *Elektronik – konstrukcje, technologie, zastosowanie*, Vol. 5, 53-56.
17. **Lipiński M.: 2011:** Tekstutowanie krzemu metodą trawienia chemicznego z użyciem katalizacyjnego palladu. *Elektronik – konstrukcje, technologie, zastosowanie*, Vol. 4, 59-62.
18. **Macdonald D.H., Cuevas A., Kerr M.J., Samundsett C., Ruby D., Winderbaum S., Leo A., 2004:** Texturing industrial multicrystalline silicon solar cells, *Solar Energy*, Vol. 76, 277-283.
19. **Park S.W., Kim J., 2003:** Application of acid texturing to multi-crystalline silicon wafers. *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 43, 423-426.
20. **Shirasawa K., Takahashi H., Inomata Y., Fukui K., Okada K., Takayama M., Watanabe H., 1994:** Large Area High Efficiency Multicrystalline Silicon Solar Cells. *Proc. of the 12th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, vol. 1, 11-15 April, Amsterdam, 757-760.
21. **Szlufcik J., Fath P., Nijs J., Mertens R., Willeke G., Bucher E., 1994:** Screen Printed Multicrystalline Silicon Solar Cells with a Mechanically Prepared V-Grooved Front Texturization. *Proc. of the 12th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Vol. 1, 11-15 April, Amsterdam, 769-772.
22. **Winderbaum S, Reinhold O, Yun F., 1997:** Reactive ion etching (RIE) as a method for texturing polycrystalline silicon solar cells. *Solar Energy Mater. Sol. Cells*, Vol. 46, 239-248.
23. **Vazsonyi E, Clercq KD, Einhaus R, Kerschaver EV, Said K, Poortmans J, Szlufcik J, Nijs J., 1999:** Improved anisotropic etching process for industrial texturing of silicon solar cells. *Solar Energy Mater Sol Cells*, Vol. 57, 179-188.

24. **Xiao-She H., Yi-Jie Z., Hao-Wei W., 2010:** The effect of texture unit shape on silicon surface on the absorption properties. *Solar Energy Mater. Sol. Cells*, Vol. 94, 258-262.
25. **Younkin R., Carey J., Levinson J., Crouch C., Mazur E., 2003:** Infrared Absorption by Conical Silicon Microstructures Made Using Femtosecond Laser Pulses in a Variety of Background Gases. *Journal of Applied Physics*, Vol. 93, 2626-2629.
26. **Zhao J., Wang A., Green M., 1998:** 19.8% Efficient Multicrystalline Silicon Solar Cells with Honeycomb Textured Front Surface. *Proc. of the 2nd World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion*, 6-10 July, Vienna, 1681-1684.
27. **Zuev D.A., Novodvorsky O.A., Lotin A.A., Shorokhova A.V., Khramova O.D., Untila G.G., Poroykov A.Y.,**

**Kost T.N., Chebotareva A.B., 2012:** Application of laser texturing method for mc-Si solar cells fabrication. *Mat. Konf.: ALT 12 Advanced Laser Technologies*, 2-6.09.2012

#### ANALYSIS METHODS OF SURFACE TEXTURING SILICON CRYSTAL USED IN PHOTOVOLTAICS

**Summary.** This paper analyzes the methods of texturing the surface of silicon wafers used in solar cells. The methods of etching monocrystalline silicon plate in alkaline solutions, methods for etching polycrystalline silicon in an acid medium, and the laser treatment using laser machining mixed and chemical etching. On the basis of published studies, the absorption of light radiation rated the different technologies in terms of their practical usefulness for the construction of high-performance solar panels.

**Key words:** solar cells, laser texturing silicon, photovoltaics.