

XII Międzynarodowa Konferencja - Electromachining 2015



UNIwersytet Technologiczno-Przyrodniczy
Wydział Inżynierii Mechanicznej, Zakład Inżynierii Produkcji
STOWARZYSZENIE INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW
MECHANIKÓW POLSKICH – Koło Uczelniane UTP

85-789 Bydgoszcz, ul. Kaliskiego 7
tel. (0 52) 340-87-47, fax. (0 52) 340-82-45,
e-mail: tomasz.paczkowski@utp.edu.pl

Modelowanie parametrów oczekiwanej powierzchni krawędzi ogniwa fotowoltaicznego - po cięciu techniką WEDM

Modeling the expected parameters of the surface edge of the photovoltaic cells after WEDM cutting technique

TOMASZ STECHNIJ¹
STANISŁAW ZABORSKI²
ADAM SUDZIK³

W artykule zwrócono uwagę na istotność zagadnienia technologii cięcia krzemu fotowoltaicznego, równocześnie ukazując korespondencję z konsekwencjami elektrycznymi obróbki krzemu. Stosowano cięcie elektroerozyjne (WEDM), a następnie oceniano stan krawędzi po obróbce posługując się modelowanym rozplywem cieczy na powierzchniach podziału.

SŁOWA KLUCZOWE: cięcie elektroerozyjne, krzem, fotowoltaika, struktury geometryczne powierzchni.

The article is focused on the importance of issues of cutting technology of photovoltaic silicon. Applied electro discharge machines (WEDM) and then evaluated the status of the edge. After treatment used the model liquid on the surface – the watershed method.

KEYWORDS: WEDM, silicon, photovoltaics, surface roughness

Wstęp

Sztandarowy problem w technologii fotowoltaicznej to koszt wytworzenia 1 W mocy zainstalowanej. Koszt ten mógłby być znacząco zredukowany, jeżeli zostałyby ograniczone straty (materiałowe i jakościowe-elektryczne) podczas cięcia i lepiej zagospodarowany odpad (np. jako dodatek do stali stopowych). Bez wątpliwości problemem produkcji w skali przemysłowej jest kruchość krzemu i trudności przenoszenia wyrobu pomiędzy stanowiskami produkcyjnymi - to też jest czynnik kosztotwórczy.

Krystaliczny krzem pozostaje nadal dominującym materiałem w produkcji ogniw fotowoltaicznych.

¹dr inż. Tomasz Stechnij (t.k.stechnij@inbox.com),

²prof. dr hab. inż. Stanisław Zaborski (stanislaw.zaborski@pwr.edu.pl),

³mgr inż. Adam Sudzik (adam@artsilver.pl).

Uwzględniając takie czynniki, jak: straty w procesie wzrostu kryształu, straty na etapie topnienia, straty podczas cięcia, odrzuty na etapie kontroli jakości produktu, tylko około 70% masy początkowej surowca stanowi użyteczny materiał. 30 % materiału to pył i ścinki. Jest to zatem znaczna ilość. Pozostaje więc nadal pytanie, jak lepiej produkować i ciąć krzem? Tak więc w procesie cięcia i operowania surowcem w zakresie owych 30% jest pole do usprawnień.

Cięcie jest bardzo często pierwszym (a czasami jedynym) etapem procesu technologicznego; kształtowanie materii zazwyczaj polega na jej podziale. Od jakości wykonania tej operacji zależą właściwości powierzchni przecięcia wpływające na dalszy proces obróbki wyrobu. O wyborze odpowiedniego schematu obróbki decydują względy technologiczne, rodzaj materiału obrabianego i czynniki ekonomiczne [1]. Cięcie w typowej produkcji ogniw występuje w kontekście podziału brył krzemu na mniejsze fragmenty, następnie na płyty, kolejno może być realizowane cięcie (przycinanie) gotowych ogniw. Autorzy pracy opowiadają się za awangardową i innowacyjną sekwencją wytwórczą, mianowicie należy krzem ciąć z brył na jak największe płyty, a później przejść do cięcia płytek technikami obróbek niekonwencjonalnych.

Celem cyklu badawczego jest podejście oparte na interdyscyplinarności zastosowanych metod. Jeden biegun stanowią fenomenologiczne metody badań mechanicznych, takie jak ocena struktury geometrycznej powierzchni, dobór i analiza parametrów cięcia, pomiary twardości, mikroskopia morfologii. Drugi biegun to zjawiska elektryczne w półprzewodniku, w znacznym stopniu powiązane z uzyskiwanymi rezultatami cięcia materiałów. W większości znanych autorom artykułu publikacjach naukowo-technicznych problem nie jest eksplorowany na sposób interdyscyplinarny, gdyż znajduje się na pograniczu

mechaniki i fizyki półprzewodników; dziedzin pozornie rozłącznych.

Badania

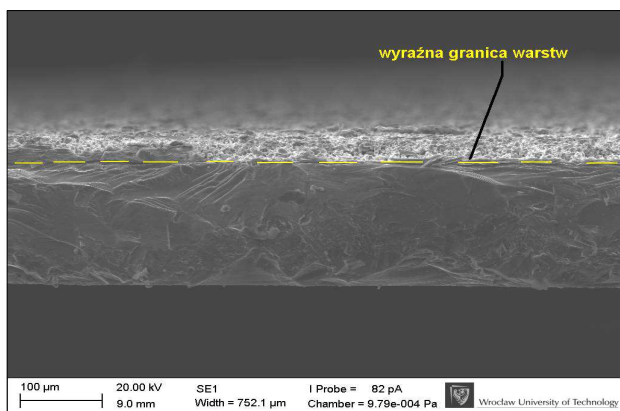
W ramach badań przecinano płytki gotowych ogniw polikrystalicznych i monokrystalicznych. Kilkadziesiąt systematycznych prób doboru parametrów doprowadziło do uzyskania zadowalających efektów i dało możliwości operowania kształtem wycinanego przedmiotu innym niż prostoliniowe kontury (czego nie udało się uzyskać - poza odcinkami prostoliniowymi - w przypadku innych zbadanych technik cięcia). Badania prowadzono na dwóch obrabiarkach sterowanych numerycznie: DK 7725A oraz AU-300i Stosowano elektrody drutowe [5] różnorodnych średnic i materiałów: miedziane, mosiężne, mosiężne ocynkowane, molibdenowe, wolframowe. Najlepsze wyniki uzyskano dla elektrod molibdenowych, przy średnicy drutu 0,18 mm, dielektrykiem był preparat na bazie wody destylowanej. Prądy podczas cięcia były małe i standardowy układ pomiarowy obrabiarki rejestrował je z dużą niepewnością pomiarową, napięcie wynosiło ~28 - 30V. Posuw był w każdym z przypadków zbliżony, dochodził do ~0,25 mm/s. Uzyskiwano wydajność na poziomie 0,4 mm²/s, co jest wartością niską w porównaniu z typowymi dla cienkich blach stalowych wydajnościami, rzędu 2 mm² / s.

Wytyczne dla oczekiwanego rozkładu rzędnych

Stan krawędzi po cięciu ma wpływ na półprzewodnik; z punktu widzenia przeanalizowanej teorii półprzewodnictwa korelacja ta wydaje się oczywista [4], ale udzielenie konkretnej odpowiedzi technologicznej, co do oczekiwanej metody cięcia i sposobów sprawdzania jego efektywności, jest zagadnieniem rozbudowanym.

Podstawową przesłanką jest fakt wielowarstwowej budowy ogniwa. Jeżeli w wyniku cięcia nie nastąpiło stopienie warstw materiału i zniszczenie „izolacji” parametry ogniwa pozostaną (*ceteris paribus*) nie zmienione. Oczywiście przemiany cieplne w materiale emitera i bazy również prowadzą do pogorszenia charakterystyki, ale udział zwarcia krawędziowego jest w tym fakcie decydujący [4].

Poszukując dostrzegalnej prawidłowości należy zwrócić uwagę na krawędź ogniwa przeciętego w sposób ukazany na rysunku 1.

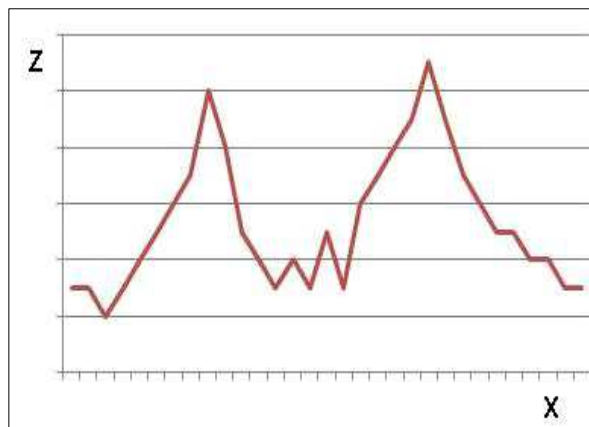


Rys. 1. Doświadczalnie wyselekcjonowany typ powierzchni przecięcia ogniwa krzemowego najkorzystniejszy użytkowo

Analiza warstwy wierzchniej krawędzi przecięcia wafli krzemowych powinna obejmować potencjalne implikacje dla parametrów fotoelektrycznych a dobrana technika separacji materiałów spełniać kryteria uzyskanych w toku badań dopuszczalnych parametrów zmian fizycznych oraz SGP (struktury geometrycznej powierzchni).

Odnosząc się do jakościowego spostrzeżenia związanego z oporem na krawędziach i zwarciami międzywarstwowym – powierzchnie z odsoniętymi warstwami to takie, gdzie rozkład rzędnych profilu (prostopadłego do kierunku cięcia) krawędzi jest bimodalny (rys. 2).

Obróbka, tworząca na krawędzi przeciętego ogniwa krzemowego rozkład bimodalny rzędnych powierzchni, jest



Rys. 2. Typowy rozkład bimodalny rzędnych profilu

w kontekście fotowoltaicznym statystycznie oczekiwaną [2]. Negując to stwierdzenie można podać istotne wytyczne:

- nie powinien być to rozkład normalny (Gausa),
- ze względu na dwuwarstwowość przełomu rozkład oczekiwany powinien być rozkładem skończym (co ukazują odpowiednie wskaźniki Ssk (Rsk) i Sku (Rku)),
- powinna zachodzić wyraźna różnica ($\Delta\% > 20\%$) pomiędzy modami obu rozkładów składowych.

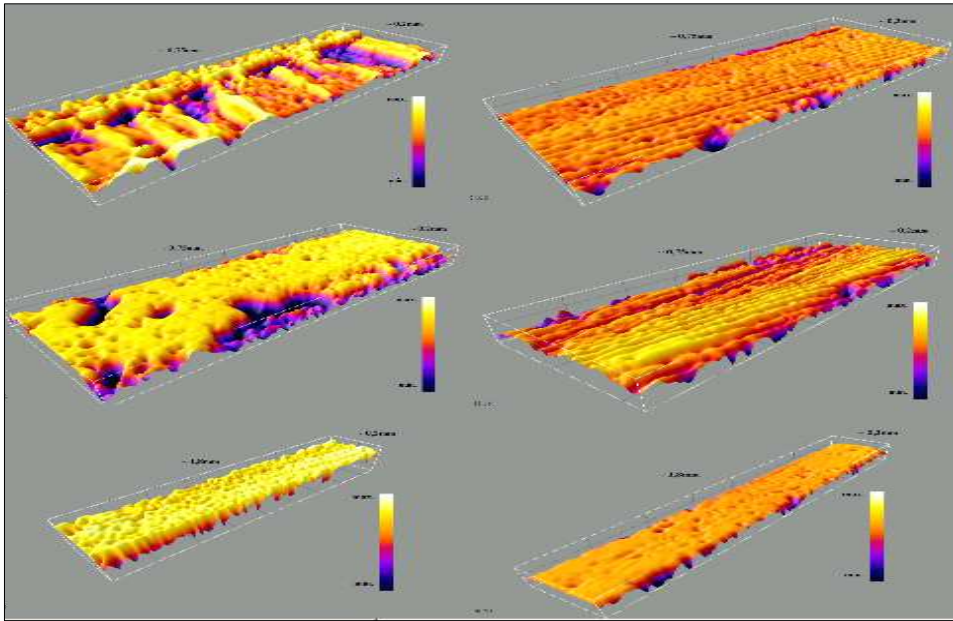
Analiza powierzchni metodą wododziałów (*watershed*)

Metodą pozwalającą ilościowo analizować fakt dwuwarstwowości struktury geometrycznej przeciętego ogniwa jest analiza powierzchni resztkowej i nośności powierzchni wykonywana aparatem symulowanego rozlania cieczy na powierzchni po obróbce (z angielskiego *watershed*, czyli analiza wododziałów). Pozwala ona także oddzielać frakcje obserwowanych ziaren na fakturze powierzchni [3, 6, 7]. Stosowano mikroskopię (rys. 3). świetlną (w tym konfokalną oraz *focus stacking*) a także elektronową.

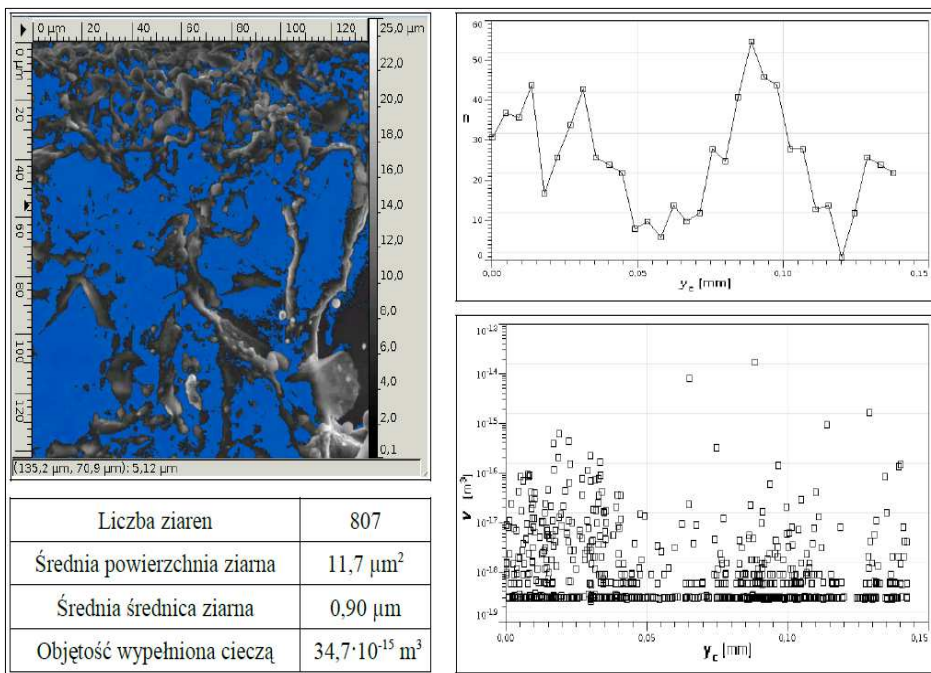


Rys. 3. Stanowisko mikroskopii 3D

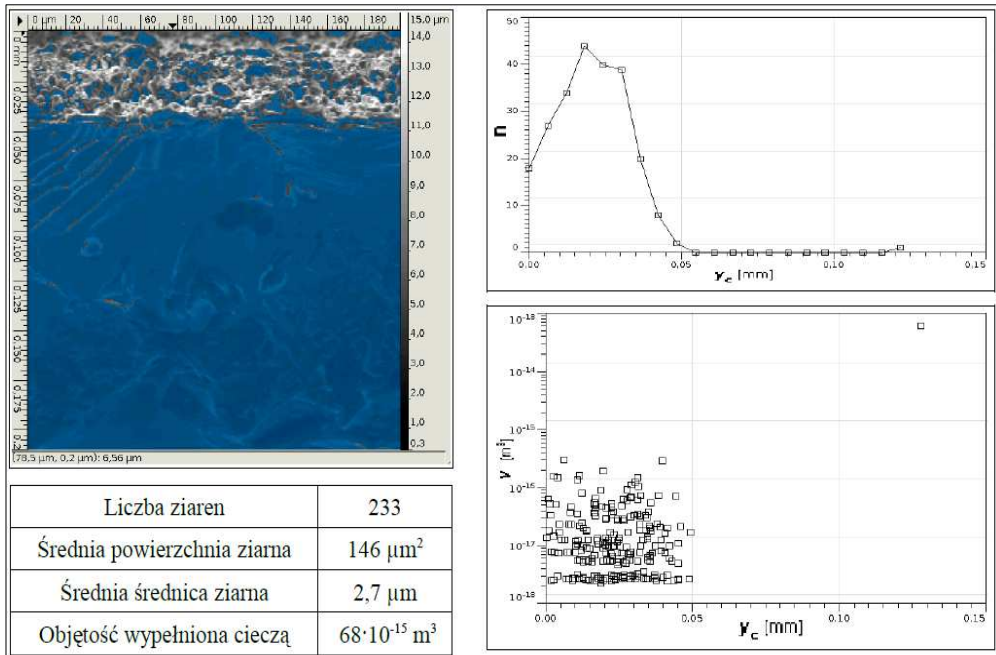
Obróbka krawędzi krzemowych ogniw fotowoltaicznych niesie zestaw specyficznych defektów i zjawisk oraz nierzadko generuje diametralne struktury geometryczne powierzchni przecięcia (rys. 4).



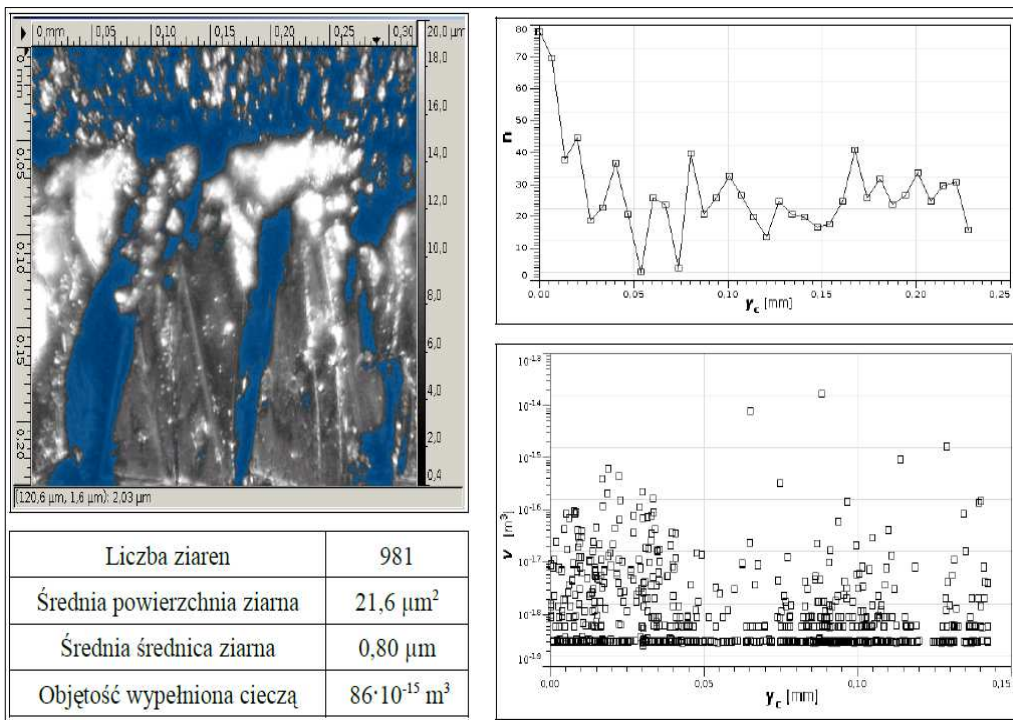
Rys. 4. Prezentacja różnorodności SGP uzyskiwanych na krawędzi przecięcia krzemu fotowoltaicznego, każda jest przyczynkiem zmian parametrów elektrycznych



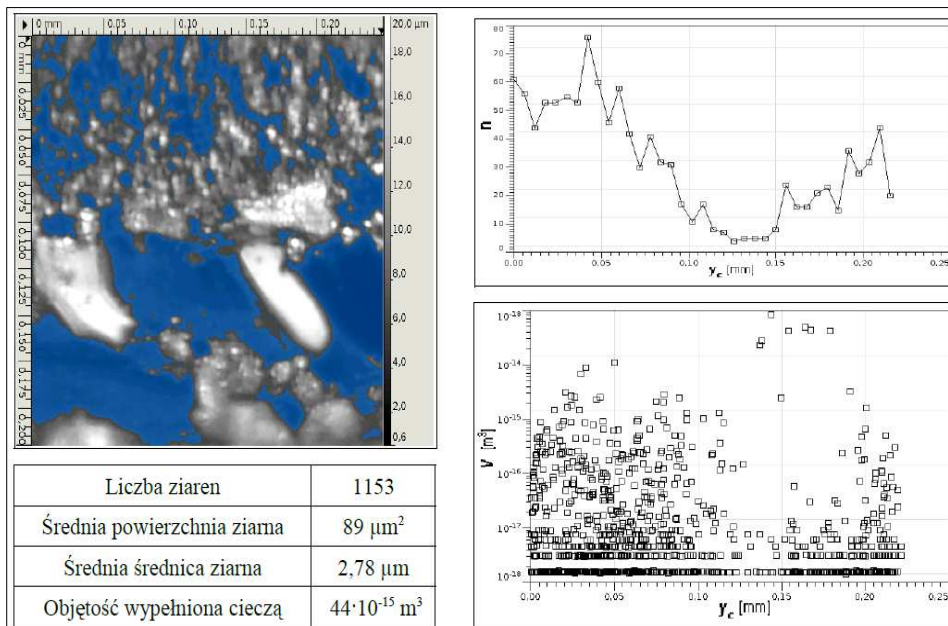
Rys. 5. Symulacja i analiza rozplywu cieczy na powierzchni, po cięciu WEDM (wariant 1)



Rys. 6. Symulacja i analiza rozplywu cieczy na powierzchni, po cięciu WEDM (wariant 2)



Rys. 7. Symulacja i analiza rozplywu cieczy na powierzchni, po wybranym cięciu mechanicznym, dającym powierzchnię bimodalną



Rys. 8. Symulacja i analiza rozplywu cieczy na powierzchni, po wybranym cięciu laserowym, dającym powierzchnię bimodalną

kryształ na przełomie powodują większe „zwarcie” wewnętrzne w ogniwie (albo zwiększają rezystancję szeregową pasożytniczą). Wszystko to ma odzwierciedlenie w długości krzywej nośności na profilogramie. W toku pomiarów wykazano, że rodzaj geometrycznej struktury powierzchni warstwy wierzchniej na krawędzi przecięcia ma związek z napięciem jałowym i rezystancją ogniwa.

Podsumowanie

Podsumowanie zawiera dodatkowe konkluzje z całego szeregu przeprowadzonych badań [4, 5], których z powodów edycyjnych nie można opublikować w niniejszym artykule. Aczkolwiek są one istotne w całościowym spojrzeniu na zagadnienie.

- Najlepsze wyniki cięcia krzemu techniką WEDM uzyskano dla elektrod molibdenowych, przy średnicy drutu 0,18 mm.

- Estymowanie powierzchni krzemu stosowanego w układach fotowoltaicznych dobranym zestawem parametrów znanych z technologii maszyn jest przydatne, aczkolwiek wymaga posługiwania się całościową wiedzą w zakresie statystycznej analizy powierzchni. Wskaźniki te mogą być pośrednio użyteczne do oceny właściwości elektrycznych półprzewodnika. Niemożliwym jest jednoznaczna ocena powierzchni półprzewodnika jedynie kilkoma wybranymi wskaźnikami (np. Ra, Rz), należy posługiwać się całą mapą powierzchni wraz z jej statystyczną analizą rozkładu. Taką metodą jest m.in. metoda wododziałów – zaprezentowana w niniejszej publikacji.

- Najlepsze rezultaty charakterystyk fotoelektrycznych uzyskano dla powierzchni o bimodalnym rozkładzie rzędnych profilu i zaznaczonej dwu- albo trójwarstwowości.

- Analizy zmian struktur powierzchni krawędzi przecinanych ogniów pozwalają wnioskować o zmianach wartości oporów pasożytniczych oraz stanie „izolacji” złącza półprzewodnikowego pomiędzy warstwami składowymi.

- W obróbkach erozyjnych przetopienia pomiędzy warstwami ogniów na krawędziach pozwalają wnioskować, iż w strefach stopionych powstanie opór pasożytniczy.

Analizę rozplywu cieczy po powierzchniach bimodalnych przełomów przeciętych ogniów ukazują kolejne rysunki 5 do 8. Przyjęto następujące warunki symulacji eksperymentu: poziom cieczy to 20 % maksymalnej wysokości SGP, czyli $0,2 \cdot S_{t \max}$.

Analizy na zamieszczonych obok modeli rozplywu wykresach pokazują licznosc wystapienia pól cieczy (wododziałów) – n od współrzędnej położenia y_c . We wszystkich przypadkach widać wyraźnie dwu- lub trójpodział zagęszczenia pól cieczy – co wynika z ich rozplywu w dwóch rodzajach ziaren, odstoniętych w wyniku cięcia. Wykresy $V(y_c)$ ukazują na skali logarytmicznej częstość wystapienia danej objętości w zależności o współrzędnej y płaszczyzny przecięcia. Wyraźnie widać możliwość identyfikacji dwóch rodzajów wypełnień o wyraźnych dominantach. W ramach dostrzeżonych statystycznych prawidłowości powierzchni obrabianej, zaobserwowano korzystny wpływ zmniejszania się udziału nośnego na później pomierzone parametry fotoelektryczne (wyników nie zaprezentowano). Zauważono, że względnie średnie/drobne

- Najczęściej zaobserwowanymi powierzchniami po cięciu metodami erozyjnymi (laser i WEDM) krzemu fotowoltaicznego są anizotropowe struktury o niesymetrycznym rozkładzie gęstości amplitud, dominują powierzchnie anizotropowe losowe i anizotropowe mieszane.

- Najistotniejszym wymaganiem odnośnie jakości powierzchni przecięcia krzemu fotowoltaicznego jest uzyskanie jak najmniejszej ilości defektów wpływających na zjawisko fotoelektryczne.

LITERATURA:

- [1] Styp-Rekowski M.: Obróbki hybrydowe i nietradycyjne jako uzupełnienie zbioru technik wytwarzania skoncentrowanymi nośnikami energii. Wybrane zagadnienia obróbek skoncentrowaną wiązką energii, red. Styp – Rekowski M., Wydawnictwo Bydgoskiego Towarzystwa Naukowego, Bydgoszcz 2003.
- [2] Lange O., Banasiński A.: Teoria statystyki. Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 1968.
- [3] Tagliaferri F., Pagano N., Leone C., Palumbo B.: Statistical analysis of fiber laser machining of titanium alloy. Department of Aerospace Engineering, University of Naples "Federico II", Naples, Italy 2010.
- [4] Stechnij T., Zaborski S., Poroś D.: Sposoby oceny płytek krzemowych w ogniwach fotowoltaicznych, w kontekście stosowanych obróbek. Energetyka 11/2012.
- [5] Poroś D., Zaborski S., Stechnij T.: Właściwości elektrod drutowych do wycinania elementów z materiałów stosowanych w energetyce. Energetyka 11/2012.
- [6] Oczóś K., Liubimov V.: Struktura geometryczna powierzchni. Rzeszów 2008.
- [7] Nowicki B.: Struktura geometryczna powierzchni. Chropowatość i falistość powierzchni. WNT, Warszawa 1991.