

Stanisław ZABORSKI<sup>1</sup>  
Tomasz STECHNIJ<sup>2</sup>  
Dariusz POROŚ<sup>1</sup>

## **METODY CIĘCIA TERMICZNEGO WAFLI KRZEMOWYCH NA POTRZEBY FOTOWOLTAIKI**

Opracowanie jest syntetycznym ukazaniem typowych struktur geometrycznych powierzchni (SGP), występujących na krawędziach krzemowych ogniw fotowoltaicznych. Genezą owych struktur jest zastosowany zespół technik oddzielania materiału, w rozpatrywanym przypadku krzemu. Uwagę badań skoncentrowano wokół poszukiwania hipotetycznego wpływu na pracę ogniwa krzemowego, niekonwencjonalnych obróbek krawędzi, zwłaszcza, laserowej. Celem porównania i oceny ukazano także powierzchnie pochodzące od cięcia tradycyjnymi, mechanicznymi metodami. Artykuł zawiera szereg materiału będącego wynikiem badawczej pracy katalogującej typowe SGP krzemu fotowoltaicznego. Powierzchnie te zostały ocenione według klasycznych norm opisu SGP, pomierzono je i obliczono stosowne wskaźniki.

### **1. KSZTAŁTOWANIE KRAWĘDZI PANELI FOTOWOLTAICZNYCH**

Niniejsza publikacja ogniskuje uwagę wokół fragmentu procesu wytwórczego klasycznych krzemowych ogniw fotowoltaicznych, czyli obróbki krzemu. Pomimo wielu badań i różnorodnych znanych półprzewodników, wśród ogniw fotowoltaicznych nadal najbardziej rozpowszechnione są krzemowe. Wykazują one także względnie największą sprawność konwersji fotoelektrycznej. Bariery technik wytwarzania są jednymi z kluczowych dla masowego rozpowszechnienia fotowoltaiki. Stosowany system technologiczny determinuje podstawowe parametry elektryczne oraz opłacalność użytkowania ogniw jako produktu, w całym jego cyklu życia.

W skali świata obserwuje się, w dziedzinie ogniw fotowoltaicznych, dużą dynamikę wzrostu produkcji. Na przestrzeni ostatnich lat oscyluje ona w granicach 45% przyrostu rocznie. Przewodzący wytwórcy prowadzą intensywne działania badawczo-wdrożeniowe nad zmniejszeniem kosztów wytwarzania, przy jednoczesnej próbie maksymalizacji sprawności.

---

<sup>1</sup> Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji, Politechnika Wroclawska

<sup>2</sup> Wydział Zarządzania i Informatyki PWSZ im. Witelona w Legnicy

Główny światowy akcent badawczy jest ostatnio położony na radykalne zmniejszenie kosztów produkcji przy równoczesnym uproszczeniu poznanych dotychczas technologii. Istotnym problemem obróbki są straty materiałowe w trakcie cięcia krzemu; dochodzące do 30% masy materiału wyjściowego. Zachodzi zatem konieczność ciągłego usprawniania rozwiązań w zakresie procesu produkcyjnego typowych ogniw krzemowych, głównie poprzez efektywniejsze techniki oddzielania materiału i oceny stanu powierzchni po cięciu.

Fundamentalnie można stosowane dziś metody podziału krzemu krystalicznego rozdzielić na dwa nurty: obróbek konwencjonalnych, gdzie dominuje transmisja energii w postaci mechanicznej oraz niekonwencjonalnych, czyli takich, gdzie strumień energii jest przekazywany inaczej niż w postaci energii mechanicznej, bądź też hybrydowo z udziałem mniejszym lub większym innych postaci energii niż mechaniczna. Utrwalone już tradycją metody cięcia krzemu fotowoltaicznego to:

- cięcie mechaniczne piłą płaską;
- cięcie drutem zbrojonym;
- cięcie tarczami diamentowymi, z zewnętrznym obwodem skrawającym;
- cięcie strumieniem cieczy (współcześnie niestosowane).

Nowocześniejsze metody cięcia to:

- laserowe;
- hybrydowe, laserowo-wodne.

Warto odnieść się krytycznie do słuszności wielu przyjętych i utrwalonych w przemyśle fotowoltaicznym metod, nie zawsze adekwatnych do potrzeb. Takimi metodami są mechaniczne metody cięcia, zapożyczone z praktyki obróbek metali. Współczesne tendencje zmierzają do stosowania dla krzemu obróbek hybrydowych bądź całkowicie innowacyjnych lub niekonwencjonalnych.

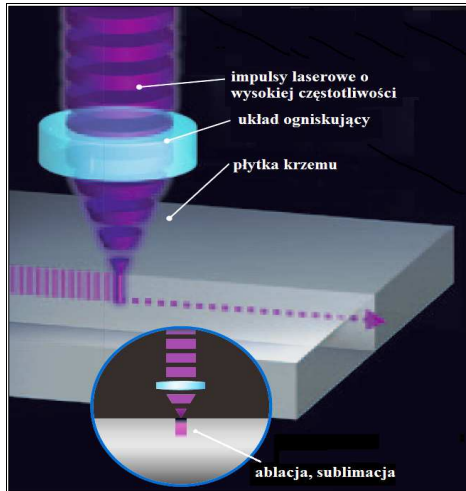
Na podstawie studiów literaturowych można wywnioskować, że najodpowiedniejszą w zakresie cięcia jest obróbka laserowa i laserowo-wodna, co wynika z analizy fizyki oraz geometrii powierzchni ogniw [4], a także wpływu strumienia energii obróbkowej na kluczowe parametry eksploatacyjne ogniw [3].

### 1.1. ISTOTA CIĘCIA KRZEMU WIĄZKĄ LASERA

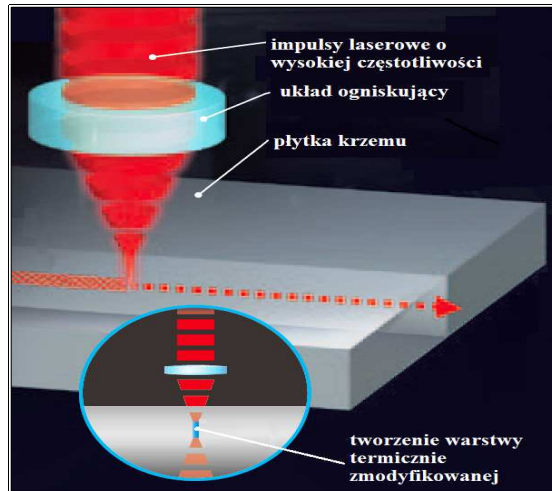
Do zastosowań fotowoltaicznych używa się krzemu o pośrednim, pomiędzy metalurgią a elektroniką układów SVLSI, poziomie zanieczyszczeń. Aplikuje się krzem monokrystaliczny, oraz multikrystaliczny i polikrystaliczny. Przyjęło się nazywać go krzemem „słonecznym”. Jest to materiał, który gwarantuje przy przeciętnej technologii odpowiednią sprawność ogniw ( $\eta > 10\%$  i  $< 20\%$ ). Krzem jest surowcem względnie kruchym i twardym, podobnym w wielu zachowaniach podczas obróbki do ceramiki. Twardość krzemu w skali Brinella to  $HB \approx 11000 \text{MPa}$ , a moduł Younga sprężystości podłużnej  $Y \approx 112 \text{GPa}$ . Gęstość krzemu wynosi  $2330 \text{kg/m}^3$ , temperatura topnienia  $T = 1683 \text{K}$ , współczynnik przewodzenia ciepła  $\lambda = 148 \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .

Proces laserowego cięcia krzemu jest zazwyczaj sterowany w dwóch zasadniczych kierunkach przebiegu: ablacji albo szybkiego przetopu. Oba zabiegi powinny być

wykonywane w atmosferze gazów obojętnych ( $N_2$  lub  $Ar_2$ ).



Rys. 1. Proces ablacji podczas cięcia laserowego  
Fig. 1. Ablation process during laser cutting



Rys. 2. Proces szybkiego przetopienia laserowego  
Fig. 2. Short melting during laser cutting

Każda z metod (rys. 1 i 2) charakteryzuje się specyficznymi cechami.

Ablację charakteryzują:

- krótki czas impulsu ( $<1\mu s$ );
- duża częstotliwość impulsów (rzędu kHz);
- duża gęstość mocy (rzędu  $kW/mm^2$ );
- ogniskowanie wiązki na powierzchni przedmiotu albo za przedmiotem;
- umożliwia cięcie (w zależności od materiału) obiektów o grubości od  $10\mu m$ ;
- powoduje szybkie odparowanie materiału i minimalizuje strefę wpływu ciepła;
- niweluje obciążenia na krawędziach oraz naprężenia po obróbce;
- jest zalecana do obróbki przedmiotów twardych i kruchych (np. krzem).

Szybki przetop charakteryzują:

- dłuższy impuls tnący ( $>20\mu s$ );
- praca ciągła wiązki podstawowej;
- gęstość mocy rzędu  $hW/mm^2$ ;
- ogniskowanie wiązki wewnątrz przedmiotu, np. w połowie odcinka grubości;
- tworzenie wewnątrz przełomu warstwy stopionej, powodując tym samym naprężenia, implikujące oddzielanie materiału;
- występowanie minimalnej strefy zmodyfikowanej cieplnie;
- pozostawienie w obszarze uciętych krawędzi naprężeń;
- mała masowa stratność materiału, nieco mniejsza niż w przypadku ablacji;
- możliwość cięcia (w zależności od materiału) obiektów o grubości od  $50\mu m$ .

Obróbki graficznej i analitycznej dokonano głównie oprogramowaniem *open source* *WSxM* oraz w środowisku *VTK*. W pomiarach stosowano mikroskopię świetlną zwłaszcza interferencyjną, a także urządzenie *Taylor Hobson Taly Form Series 120L*.

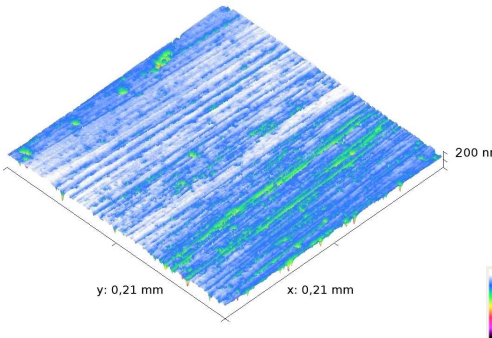
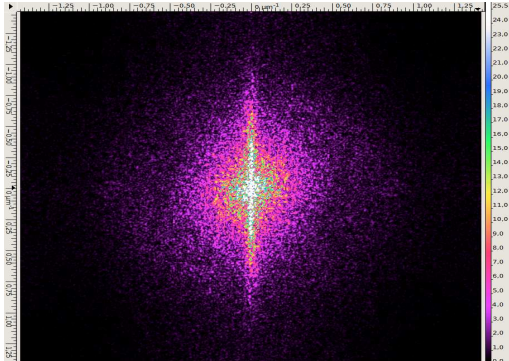
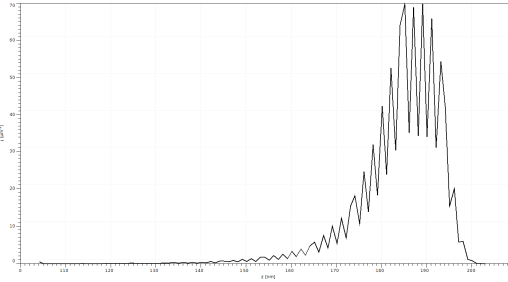
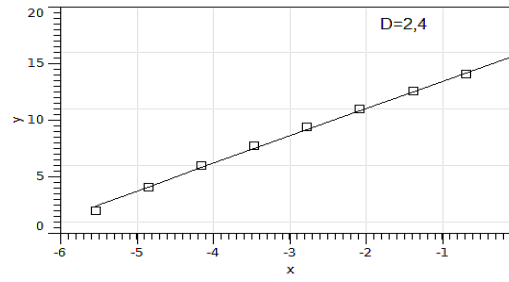
## 2. ANALIZA WYBRANYCH, TYPOWYCH STRUKTUR POWIERZCHNI

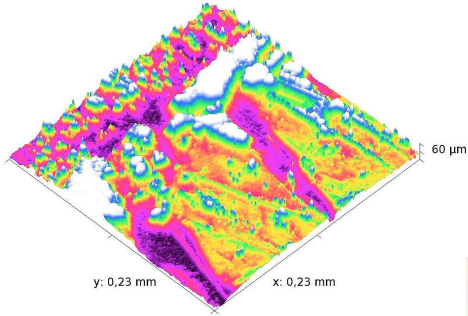
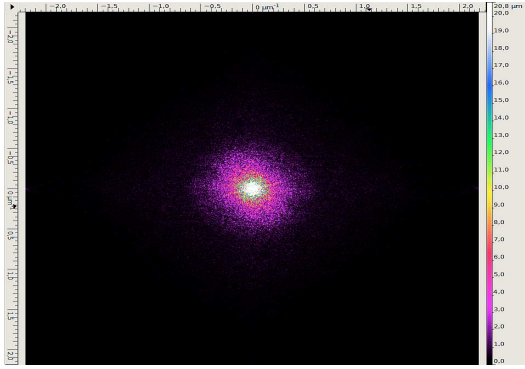
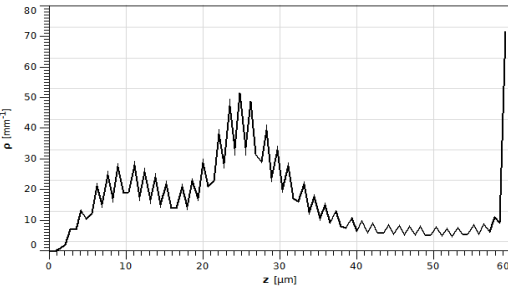
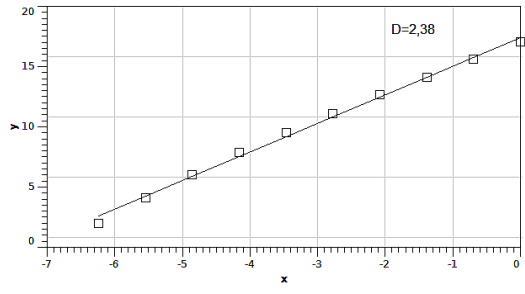
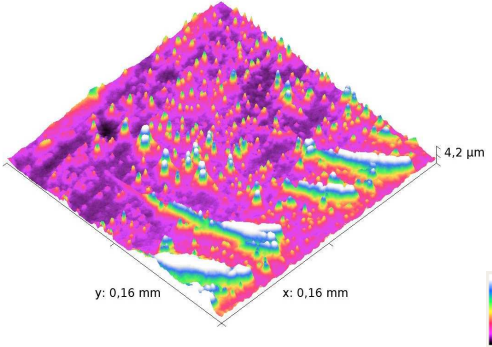
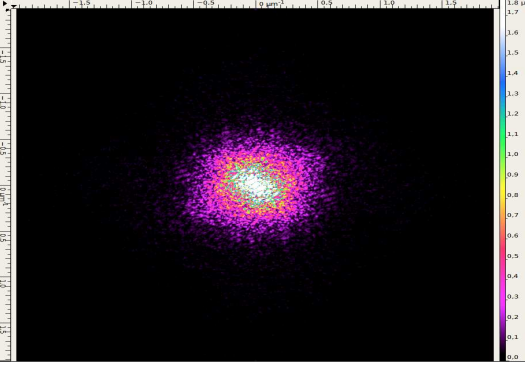
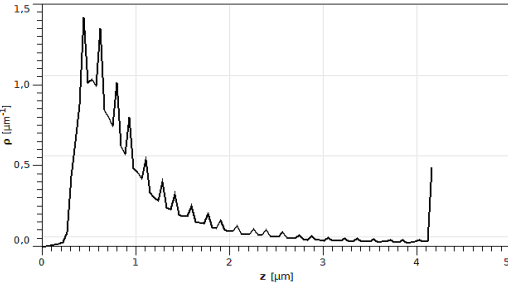
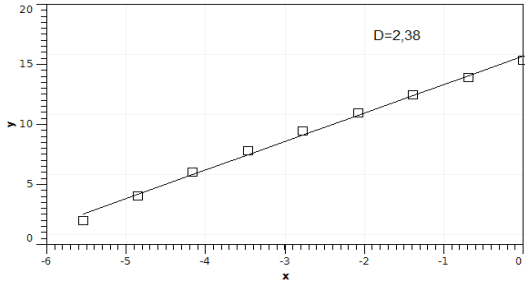
Poniżej zaprezentowano wyniki obróbek wybranych, typowych krawędzi ogniw krzemowych mono i polikrystalicznych. Materiał badawczy stanowiły fabrycznie nowe ogniwa oraz przecięte w ramach badań własnych, podczas których wykonano szereg zaplanowanych prób cięcia laserowego. Stosując szeroki zakres parametrów uzyskano możliwie obszerny materiał porównawczy. W niewielkiej objętości niniejszego artykułu nie będą rozpatrywane szczegółowe [5] parametry cięcia, ale poszukiwana będzie typowość ich następstw. Transformata Fouriera funkcji autokorelacji była obliczana zgodnie z formułą Kaiser'a (1), z przyjętym współczynnikiem  $\alpha=2,5$ ;  $I_0$  oznacza zmodyfikowaną ("zerową") funkcję Bessel'a.

$$W(x) = \frac{I_0 \pi \alpha \sqrt{4x(1-x)}}{I_0 \pi \alpha} \quad (1)$$

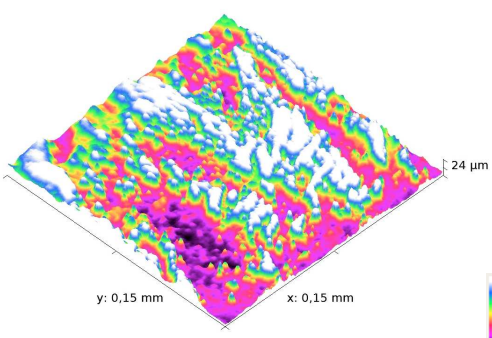
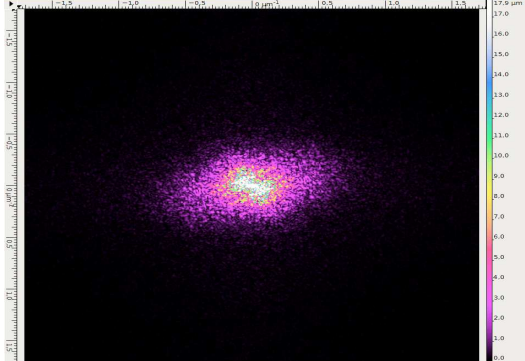
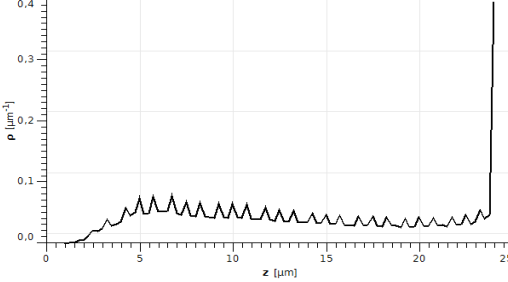
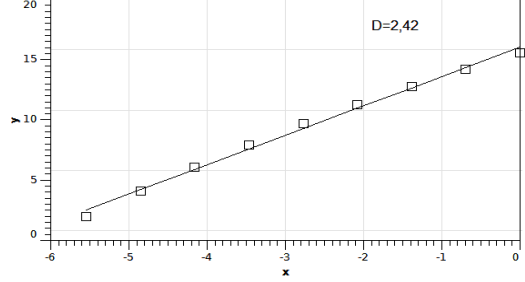
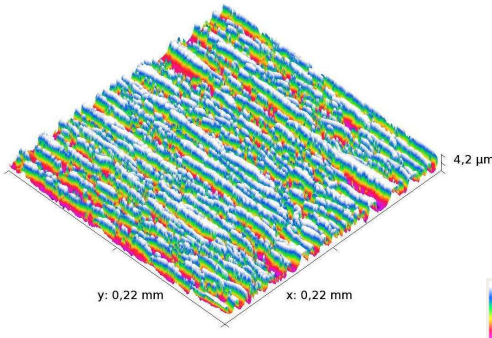
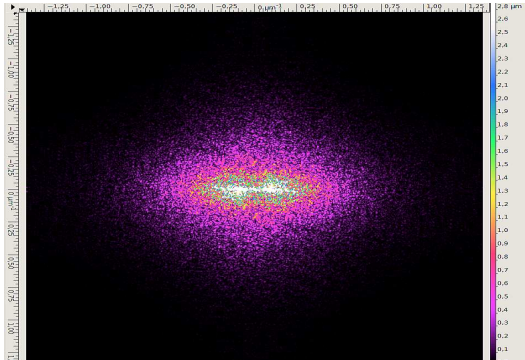
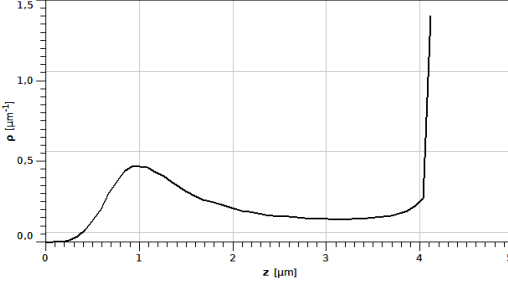
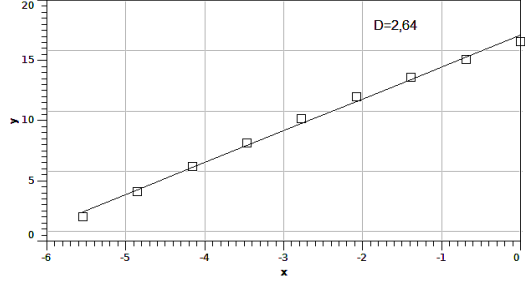
W tabeli 1 zebrano charakterystyki, uznanych za reprezentatywne, struktur geometrycznych powierzchni występujących na krawędziach ogniw krzemowych.

Tabela 1. Charakterystyki badanych powierzchni krawędzi ogniw fotowoltaicznych  
Table 1. Character of the studied surfaces in the edge of photovoltaic cells

Opis próbki	Widok (3D) powierzchni krawędzi	Transformata Fouriera funkcji autokorelacji
DETAL NR 1.  Cięcie tarczą diamentową (gr. 50 $\mu$ m) płytki monokryształu o grubości 0,25mm.		
<b>Parametry przestrzenne i amplitudowe</b>	<b>Gęstość rozkładu amplitudy</b>	<b>Wymiar fraktalny</b>
Sa=60,93nm Sq=90,82nm  <u>Wybrany profil:</u> Ra=70,31nm Rz=220,88nm Rp=130,07nm Rq=101,29nm Rku=90,06nm		

Opis próbki	Widok (3D) powierzchni krawędzi	Transformata Fouriera funkcji autokorelacji
<p>DETAL NR 2.</p> <p>Cięcie łupaniem (po wstępnym nacięciu) płytki polikrystalicznej o grubości 0,2mm.</p>		
<p><b>Parametry przestrzenne i amplitudowe</b></p>	<p><b>Gęstość rozkładu amplitudy</b></p>	<p><b>Wymiar fraktalny</b></p>
<p>Sa=11,59μm Sq=14,85μm</p> <p><u>Wybrany profil:</u> Ra=10,93μm Rz=48,22μm Rp=36,38μm Rq=13,93μm Rku=2,9μm</p>		
<p><b>Opis próbki</b></p>	<p><b>Widok (3D) powierzchni krawędzi</b></p>	<p><b>Transformata Fouriera funkcji autokorelacji</b></p>
<p>DETAL NR 3.</p> <p>Cięcie laserem (przetopienie) płytki polikrystalicznej o grubości 0,2mm.</p>		
<p><b>Parametry przestrzenne i</b></p>	<p><b>Gęstość rozkładu amplitudy</b></p>	<p><b>Wymiar fraktalny</b></p>
<p>Sa=0,65μm Sq=0,89μm</p> <p><u>Wybrany profil:</u> Ra=0,94μm Rz=3,64μm Rp=2,33μm Rq=1,09μm Rku=1,99μm</p>		



Opis próbki	Widok (3D) powierzchni krawędzi	Transformata Fouriera funkcji autokorelacji
<p>DETAL NR 4.</p> <p>Cięcie laserem (ablacja/przetop) płytki polikrystalicznej o grubości 0,2mm.</p>		
<p><b>Parametry przestrzenne i amplitudowe</b></p>	<p><b>Gęstość rozkładu amplitudy</b></p>	<p><b>Wymiar fraktalny</b></p>
<p>Sa=5,93μm Sq=6,79μm</p> <p><u>Wybrany profil:</u> Ra=4,97μm Rz=16,10μm Rp=9,98μm Rq=5,68μm Rku=1,70μm</p>		
Opis próbki	Widok (3D) powierzchni krawędzi	Transformata Fouriera funkcji autokorelacji
<p>DETAL NR 5.</p> <p>Cięcie laserem (ablacja) płytki monokrystalu o grubości 0,25mm.</p>		
<p><b>Parametry przestrzenne i</b></p>	<p><b>Gęstość rozkładu amplitudy</b></p>	<p><b>Wymiar fraktalny</b></p>
<p>Sa=1,07μm Sq=1,21μm</p> <p><u>Wybrany profil:</u> Ra=1,04μm Rz=3,87μm Rp=1,94μm Rq=1,18μm Rku=1,73μm</p>		

### 3. DYSKUSJA WYNIKÓW

Analizując przedstawione wybrane charakterystyki SGP oraz wnioski płynące z niezaprezentowanych badań własnych, dostrzeżono przejawiający się porządek. Wszystkie powierzchnie, zwłaszcza elementy 5, 1, 4, posiadają struktury ukierunkowane-równoległe. Kierunki regularności ukazują wykresy powierzchniowej gęstości widmowej mocy (transformata Fouriera). Dominują powierzchnie anizotropowe losowe i anizotropowe mieszane. Przyczyną owego stanu rzeczy jest kinematyka i dynamika narzędzi obrabiających przedmiot. W przypadku tarczy diamentowej jest to niesprężony układ pomiędzy przedmiotem a zdeterminowanym kształtowo organem roboczym obrabiarki. Odmiennie, podczas cięcia laserem nie zachodzi oddziaływanie dynamiczne od strony głowicy tnącej, chociaż jej niejednostajny, posuwisty ruch wpływa na kształtowanie powierzchni przetapianego lub sublimowanego materiału. Kinematyka przecinarki laserowej i przedmiotu jest sprzężona [9]. W zakresie kształtowania krawędzi krzemu ciętego laserem, kluczowy wpływ na anizotropowość powierzchni ma zadana częstotliwość impulsacji lasera.

Ukierunkowanie powierzchni ma wyraźny związek z wektorami posuwu narzędzia oraz przedmiotu, aczkolwiek element 5 uzyskano przy maksymalnych parametrach prędkości posuwu i częstotliwości impulsu.

Ważkim elementem przedstawionej analizy jest samopodobieństwo struktur. Obliczony wymiar fraktalny, realnie  $D \in (2; 3)$ , dla każdej z powierzchni, oscyluje wokół wartości  $D \approx 2,4$ . Implikuje to umiarkowanie chaotyczny układ struktur geometrycznych omawianych powierzchni.

Korespondującym z właściwością izo/anizotropowości powierzchni oraz jej fraktalnością, jest rozkład gęstości rzędnych (amplitud) oraz statystyczna analiza tego rozkładu. Jednym z estymatorów statystycznych stosowanych w analizie SGP, jest moment czwartej potęgi rzędnych profilu, miara skupienia, czyli kurtoza - oznaczana jako  $R_{ku}$ . Wartość  $R_{ku} \rightarrow 3,0$  oznacza, że rozkład amplitud jest bliski gaussowskiemu. Jak widać w tabeli 1 rozkłady są asymetryczne, często wykazują skośność, a w przypadku próbki nr 2 rozkład jest bimodalny, co wynika z ujawnionej w procesie cięcia, dwuwarstwowej budowy próbki. Wniosek, nie są to rozkłady Gaussa. Kurtoza  $\ll 3$  jest charakterystyczna dla uporządkowanych amplitud (przedmioty 4 i 5), zaś kurtoza  $\gg 3$  sugeruje powierzchnię anizotropową mieszaną lub quasi-izotropową losową, taki parametr, charakteryzujący się dużym skupieniem wartości rzędnych  $R_{ku} \approx 9$ , przypisany jest próbce nr 1.

W przypadku próbek 2 i 3 można zauważyć na powierzchniach obecność ekstremalnych wzniesień, co potwierdzają relatywnie wysokie parametry  $R_z$ . Genezy owych wzniesień są odmienne, w przypadku łupania są to naturalne przełomy kryształu, zaś w przypadku przetopienia laserem, przyczyną są zjawiska termo-hydrodynamiczne, powodujące powstanie narostów podczas krzepnięcia stopionej materii. Powierzchnię o najmniejszej chropowatości ( $S_a \approx 7\text{nm}$ ) generuje cięcie tarczą obrotową (próbka 1), aczkolwiek ten rodzaj obróbki cechuje duży ( $\sim 20\%$ ) udział strat materiałowych [10]. Dla próbki nr 5, ciętej szybkimi wysokoenergetycznymi impulsami laserowymi, parametr  $S_a \approx 1\mu\text{m}$ , ale straty materiałowe podczas tego cięcia są minimalne ( $< 3\%$ ).

#### 4. WNIOSKI KOŃCOWE

W ramach zrealizowanego obszaru badań, sformułowano następujące konkluzje:

- podczas obróbki laserowej dominującym nośnikiem energii jest strumień fotonów, który w reakcji z danym materiałem powoduje przepływ ciepła;
- reakcje termiczne krzemu fotowoltaicznego, jako czystego chemicznie pierwiastka i zachodzące przemiany są odmienne niż dla substancji chemicznych;
- nie zauważono, podczas cięcia, odmiennego zachowania się krzemu monokrystalicznego i polikrystalicznego;
- przy odpowiednim dobraniu parametrów, najniższą chropowatość ( $Ra \approx 1 \mu m$ ) uzyskano przy dużej energii krótkich impulsów, zatem odwrotnie niż w konwencjonalnie pojmowanej obróbce;
- w procesie ablacji powstała struktura warstwy wierzchniej nie jest wynikiem krzepnięcia mikro-nadtopień materiału, jednak przy parametrach procesu ukierunkowanych na szybkie przetopienie, warstwa wierzchnia jest wynikiem krzepnięcia mikrofragmentów;
- decydującymi o SGP krzemu są parametry lasera: prędkość posuwu, gęstość mocy, częstotliwość i wydajność impulsu;
- najczęściej występującymi powierzchniami po cięciu laserowym krzemu fotowoltaicznego są anizotropowe struktury o niesymetrycznym rozkładzie gęstości amplitud.

#### LITERATURA

- [1] DIETRYCH M., 1998, *Podstawy konstrukcji maszyn - tom 2*, WNT, Warszawa.
- [2] PRACA ZBIOROWA, 1973, *Poradnik metrologa warsztatowego*, WNT, Warszawa.
- [3] ADDISON ENGINEERING INC. 2012, [www.addisonengineering.com](http://www.addisonengineering.com).
- [4] NOWICKI B., 1991, *Struktura geometryczna powierzchni. Chropowatość i falistość powierzchni*, WNT, Warszawa.
- [5] HEIKENWALDER J., MATTHEES J.R., RICHERZHAGEN B., SEIM T., 1999, *Dicing solar cells efficiently*, Werkstattstechnik.
- [6] PN-87/M-04250, *Warstwa wierzchnia. Terminologia*.
- [7] PN-EN ISO 3882: 2004, *Powłoki metalowe i inne nieorganiczne. Przegląd metod pomiaru grubości*.
- [8] PN-EN ISO 1463: 2004, *Powłoki metalowe i tlenkowe. Pomiar grubości powłok. Metoda mikroskopowa*.
- [9] J&T TECHNOLOGY CORP. 2012, [www.jttech.com.tw](http://www.jttech.com.tw).
- [10] JUNG K., YOUNG K., 2010, *The Saw-Damage-Induced Structural Defects on the Surface of Silicon Crystals*, Department of Materials Science&Engineering, University of Incheon, Dowhadong, Republic of Korea.

#### THE METHOD OF THERMAL CUTTING SILICON WAFERS, IN PHOTOVOLTAICS

The study is synthetic exhibition of the typical surface structures, on edges of silicon photovoltaic cells. Genesis of those lattices are applied technics of the separation the material, in the considered case - silicon. The attention of investigations was concentrated around the search of the hypothetic influence on the work of the silicon cell by unconventional processings of the edge cutting. Surfaces coming from the traditional mechanical cutting methods, were also showed for comparison and opinion. The article contains the sequence of material being the result of the cataloging work, of the typical structures in photovoltaic silicon. These surfaces were estimated according to the classic standards of the description surface, measure and count appropriate coefficients.