

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

Porównanie wybranych konwencjonalnych i niekonwencjonalnych metod cięcia krzemu

Comparison selected conventional and unconventional methods of silicon cutting.

TOMASZ STECHNIJ¹
STANISŁAW ZABORSKI²
DARIUSZ POROŚ³

Artykuł jest przeglądowym opisem stosowanych przez autorów w badaniach własnych technik cięcia krzemu. Zwrócono uwagę na własne doświadczenia oraz opisano wady i zalety poszczególnych metod.

SŁOWA KLUCZOWE: cięcie krzemu, cięcie ściernicą, ciecie erozyjne.

The article is a review of techniques applied by the authors for cutting of silicon. It is noted on your own experience and describes defects advantages and disadvantages of each method.

KEYWORDS: silicon cutting, abrasive cutting, WEDM

Wstęp

Fotowoltaiczne systemy zasilania wytwarzają energię elektryczną dzięki zjawisku konwersji energii słonecznej w półprzewodnikowych ogniwach fotowoltaicznych. Systemy te zbudowane są z generatora fotowoltaicznego, oraz urządzeń kondycjonujących energię elektryczną, takich jak akumulatory czy przetworniki napięcia. Fotowoltaiczne systemy zasilania znajdują zastosowanie głównie jako systemy wolno stojące lub dołączone do sieci elektroenergetycznej. W ostatnich kilkunastu latach nastąpił gwałtowny rozwój przemysłu związanego z fotowoltaiką. Sprawność systemów fotowoltaicznych wzrosła, zaś ich cena zmalała. W wielu państwach wdrożono programy, mające na celu zwiększenie udziału energii odnawialnej w bilansie energetycznym kraju. Celem cyklu badań prowadzonego przez autorów jest pogłębienie zagadnienia i

wypracowanie warsztatu badawczego adekwatnego do problematyki.

Krzem jako materiał

Krzem jest surowcem względnie kruchym i twardym, twardość HV (0,05) ≈ 1200 moduł Younga sprężystości podłużnej $E \approx 112$ GPa. Gęstość krzemu wynosi 2330 kg/m^3 , temperatura topnienia $T = 1683 \text{ K}$ ($1410 \text{ }^\circ\text{C}$), współczynnik przewodzenia ciepła $\lambda_c = 148 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ [1, 11].

Istnieje bardzo wiele właściwości krzemu, które są pochodną obróbki i wpływają znacząco na właściwości fotoelektryczne ogniwi. Inne z kolei są pochodną procesu wytwórczego całej bryły krzemowej (np. luki w sieci czy też atomy w międzywęzłach), albo zaaplikowanej w konkretnym projekcie produkcji wyrobu myśli technicznej, mniej lub bardziej udanej.

Cięcie krzemu jako materiału technologicznego może być realizowane na wiele znanych, spośród obróbek kształtujących, sposobów.

a) Mechanicznie:

- łupaniem, łamaniem,
- piłą płaską taśmową,
- piłą tarczową, frezem tarczowo-piłkowym,
- taśmą lub drutem zbrojonym,
- ściernicami tarczowymi, np. borazonowymi, diamentowymi z zewnętrznym i wewnętrznym obwodem skrawającym.

b) Skoncentrowanym strumieniem energii (poprzez erozję strumieniem energii):

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

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

³dr inż. Dariusz Poros (dariusz.poros@pwr.edu.pl).

- ultradźwiękowe łupanie w próżni,
- strumieniem (strugą) cieczy, najczęściej wody,
- plazmowo,
- laserem (wiele wariantów),
- elektrodrutowo erozyjnie (podejście autorskie).

Podstawowe teorie zjawisk towarzyszących separacji materiałów

Fundamentalnie (podług istoty fizyki zjawisk) można stosowane dziś metody podziału materii (w tym krzemu krystalicznego) rozdzielić na dwa nurty: obróbkę 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. Narzędzie mechaniczne podczas cięcia oddziałuje na płytkę z pewną siłą, pod wpływem tej siły materiał pęka pod odpowiednim kątem – właściwym dla danej płaszczyzny krystalograficznej oraz kierunku poślizgu atomów. Wynikowo następuje podział materii. Narzędzie nie mechaniczne oddziałuje skoncentrowanym strumieniem energii, który powoduje analogiczny wynik – podział materii; chociaż przebieg procesu jest odmienny i zależny od rodzaju przekazywanej energii.

Mechaniczne przekazywanie energii; jest związane z typowymi zagadnieniami mechaniki cięcia jak: rozkład sił, tarcie, mikrotwardość, indukowane ciepło, mocowanie przedmiotu obrabianego, wibracje, rozkalibrowywanie się narzędzia, problem mocowania i prowadzenia organu roboczego. Niekonwencjonalne przekazywanie energii implikuje inny zespół dodatkowych problemów: gęstość mocy przekazywanej, częstotliwość/ciągłość wiązki skoncentrowanej, kształt i średnica wiązki, strefę wpływu ciepła - zjawiska cieplne, topnienie/sublimację/spalanie [9, 10].

Stan powierzchni krzemu po cięciu jest faktycznie stopniem naruszenia jego struktury krystalograficznej. Mikropęknięcia, chropowatość, zanieczyszczenia, odkształcenia, głębokość zniekształceń czy wydajność procesu to skutki zarówno doskonałości realizacji obranej metody jak i konsekwencja fizyki wybranej metody cięcia materii.

Cięcie krzemu na dowolnym etapie produkcji ogniwa ma wpływ na jego parametry docelowe, nie jest to jedynie materiał konstrukcyjny, ale przede wszystkim półprzewodnik. Trudności techniczne, które występują przy obróbce ogniwa wiążą potrzebę zachowania parametrów elektrycznych i fizycznych z wymogami kształtu i charakterystyki powierzchni. Omawiana wcześniej obróbka mechaniczna powoduje przede wszystkim odkształcenia plastyczne, które wpływają na obniżenie poziomu energetycznego minimum pasma przewodnictwa i podwyższenie poziomów maksimum podstawowego pasma energetycznego [12]. Efektem owych zmian jest zatem zwiększenie pasma wzbronionego. Zakłócenia sieci krystalu wpływają też na obniżenie innych parametrów elektrycznych - są one źródłem powstawania centrów rekombinacji, które zmniejszają czas życia nośników.

Uszkodzenia można typizować na dwie podstawowe warstwy: uszkodzeń mechanicznych i uszkodzeń fizycznych. Warstwa o strukturze uszkodzonej mechanicznie powstaje poprzez działanie narzędzia, np. ziaren proszku

diamentowego – powodujących wykruszenia, rysy, mikropęknięcia [4].

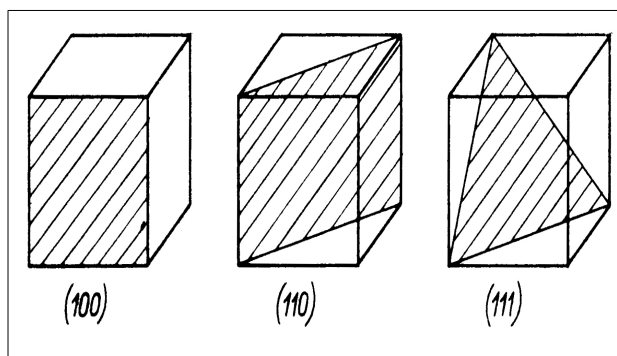
Pod wpływem obciążeń siłami, które występują w strefie cięcia, w trakcie przesuwania się materiału, w głębszych warstwach powstają szczątkowe naprężenia mechaniczne. Z kolei miejscowe generowanie wysokich temperatur (np. elektroerozja) powoduje naprężenia cieplne. Jeżeli uwidacznia się miejsce gdzie naprężenie nie powoduje mikropęknięć i widocznych mikroskopowo (w skali mikroskopu świetlnego) defektów to jest to granica warstwy zdefektowanej mechanicznie. Kolejną warstwą jest naruszona siatka krystaliczna, w której atomy uległy przesunięciu, aczkolwiek ocena tego zjawiska może być przeprowadzona na poziomie atomowym, nie zaś w ramach typowych badań technologicznych.

Każda obróbka, zwłaszcza mechaniczna, uszkadza warstwę przypowierzchniową materiału o daną grubość. Ponieważ kryształy krzemu charakteryzują się dużą twardością i kruchością, po procesie cięcia zazwyczaj są w obszarach przypowierzchniowych silnie zdefektowane. Grubość warstwy uszkodzonej mechanicznie w przecinanej płycie krzemu jest dla każdego typu obróbki różna. W obróbce ściernej kształtuje się zupełnie inaczej niż np. elektroerozyjnej. Również proporcje rozmiarów zdefektowanej warstwy mechanicznej do fizycznej są wyróżniającą funkcją sposobu cięcia jak i oczywiście zastosowanych parametrów. W najlepszych sytuacjach warstwa zdefektowana mechanicznie wynosi ~15 µm, ale w najniekorzystniejszych przypadkach - ponad 2 mm.

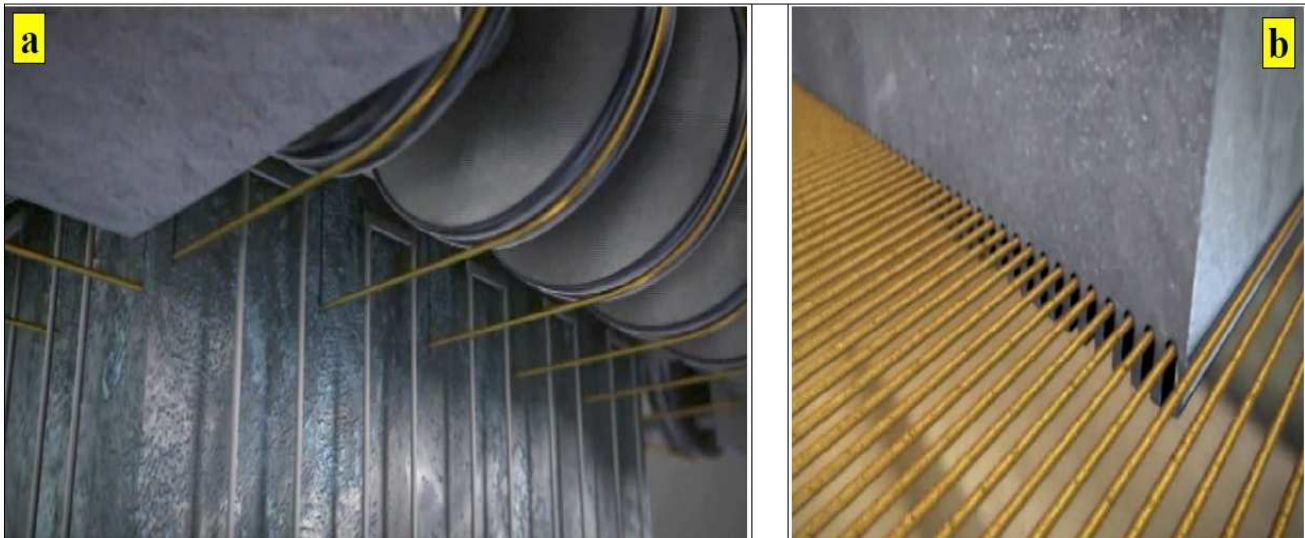
Kolejno omówiono istotne cechy wybranych sposobów cięcia krzemu; metodami tymi operowali autorzy niniejszej pracy prowadząc badania.

Podział poprzez łupanie, łamanie

Metoda podziału kryształów poprzez łupanie jest najstarszą i „najkonwencjonalniejszą” metodą podziału materiałów. Lokacja kierunku łupania jest kluczowa dla tej metody. Można jej dokonywać na podstawie wiedzy o typie kryształu i jego stałej Millera. Powierzchnie idealne krzemu mają zazwyczaj wskaźnik (1,1,0) – ale także (1,1,1) i (1,0,0). Oczywiście realne kryształy posiadają odchylenia związane z tolerancją zamocowania walca podczas procesu wzrostu. Zatem geometryczna oś monokryształu nie pokrywa się z osią krystaliczną płaszczyzny (czyli np. 1,1,1).



Rys. 1. Płaszczyzny krystalograficzne krzemu [11]



Rys. 2. Dwa najistotniejsze etapy cięcia krzemu fotowoltaicznego – realizowane konwencjonalnie, rozdzielanie bloku na mniejsze bloki (a); cięcie bloku na płyty (b)

Warto nadmienić, iż prostym (wykorzystując regułę Sneliusa), manualnym sposobem, z użyciem orientometru i światła spolaryzowanego (celem orientacji kryształu) rozłupywane są kamienie szlachetne (np. diamenty) przez jubilerów. Metodą orientacji optycznej również można ustawiać kryształy krzemu. Najlepszą metodą orientacji monokryształów jest rentgenowska, wykorzystująca odbicie i dyfrakcję promieni X od płaszczyzny krystalicznej. Łupanie wykonane wzdłuż celowego kierunku w sieci krystalicznej (rys. 1) to naturalna mechaniczna metoda rozdziału, choć nie w pełni kontrolowalna - daje powierzchnie doskonałe geometrycznie. Przy prawidłowym łupaniu, powstają przekroje ścian wzdłuż płaszczyzn sieci krystalicznych. Niekontrolowane przełamanie daje już znacznie gorsze wyniki, z punktu widzenia jakości geometrii obróbki.

Do lat 80' powszechnie stosowaną metodą dzielenia płytek półprzewodnikowych było ich rysowanie nożem diamentowym a następnie łamanie. Wykonana rysa powoduje naprężenia wzdłuż linii rysy, przy odpowiednim nacisku w obszarze naprężeń pęknięcie płytki przebiega wzdłuż rysy. Również w tej operacji pierwotnym zabiegiem jest orientacja kryształu.

Przecinanie taśmami

Jest to metoda mało efektywna, ale nadal stosowana. Najczęściej stosuje się taśmy stalowe o grubości od 0,1 do 0,25 mm, co daje względnie (przy grubości płytki 0,1 – 0,3 mm) dużą szerokość szczeliny cięcia. Istnieją trzy odmiany: piły taśmowe zębate, piły skonsolidowane z proszkiem ściernym (np. SiC, Al₂O₃), taśmy z luźno podawanym proszkiem w zawieszinie wodnej lub olejowej. Proces jest dość powolny, zwiększanie nacisków taśmy na materiał jest ograniczone ze względu na możliwość zerwania taśmy jak i wykruszenia się płytki. Stosowanie grubszych taśm celem zwiększenia nacisków na materiał (a zatem przy wzroście wartości sił stykowych) powoduje z kolei szerszą szczelinę a tym samym znacznie zwiększa straty materiałowe. Płaskorównoległość ścian krawędzi jest niezadowolająca, występują podcięcia będące wynikiem wcierania się taśmy w powierzchnie boczną płytek, wynikowo przekrój przecięcia jest geometrycznie zniekształcony – klinowaty.

Proces jest oczywiście zależny od konstrukcji obrabiarki, napędu taśmy, rolek prowadzących, mocy obrabiarki oraz typowych parametrów, jak prędkość skrawania czy posuw przedmiotu, aczkolwiek wymienione wcześniej problemy

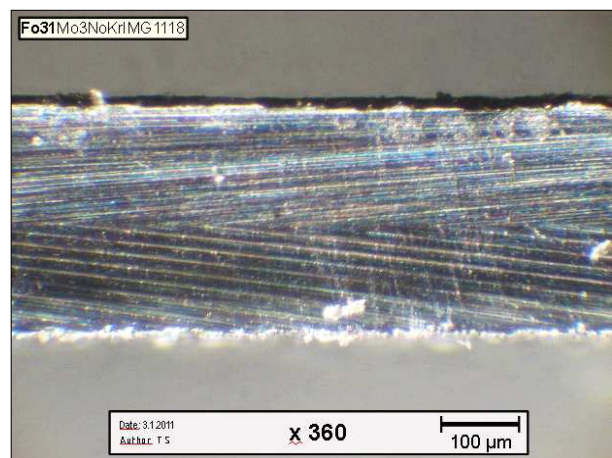
pozostają zawsze aktualne. Przykładowym producentem tego typu urządzeń jest znana firma – Norton.

Przecinanie struną zbrojoną

Podobną metodą cięcia jest zastosowanie drutu (rys. 2) albo zestawu drutów, zamiast taśm. Popularnym materiałem jest wolfram, typowa średnica drutów to 0,12 do 0,15 mm, co umożliwia zmniejszenie szczeliny w stosunku do taśm stalowych. Kolejną zaletą jest dokładność kształtu – nie obserwuje się klinowości i podcięć płytek. Podobnie jak w przypadku piły ziarno może być luźne albo związane z drutem. Podczas cięcia materiałów typu krzem i german najlepsze wyniki uzyskuje się poprzez nasyp z proszków diamentowych, najczęściej jest to diament syntetyczny [9].

W zakresie rozcinania brył krzemu na płyty, układ wielu skonsolidowanych drutów (wielostrunowy) jest powszechnie stosowany od wielu lat. Na polu cięcia płyt krzemu metoda ta jest wypierana przez nowocześniejsze obróbki, np. laserową. Pomimo występowania niewielkich sił skrawania, w czasie przecinania drutem zbrojonym, doskonalsze są techniki erozyjne, w których nie ma żadnych sił przekazywanych mechanicznie.

Przecinanie tarczą ścierną - ściernicą



Rys. 3. Rezultat cięcia płyty krzemowej tarczą z nasypem diamentowym [fotografia autora]

Cięcie ziarnem związanym, gdzie narzędziem tnącym jest tarcza, to metoda utrwalona w technologiach krzemowych. Wyróżnia się tarcze z wewnętrznym i zewnętrznym obwodem skrawającym. W roli ziarna zazwyczaj stosuje się (podobnie jak w innych metodach) diament (C), węgiel boru (BC), węgiel krzemu (SiC), elektrokorund (Al_2O_3), borazon (BN). Tarcza wykonywana jest z różnych materiałów, ale najczęściej z brązów fosforowych albo wybranych gatunków stali (np. chromonikiel austenityczny). Warunkiem jest możliwość uzyskania grubości 0,2 do 0,8 mm, przy zachowaniu sprężystości dla średnic rzędu 50-150 mm. Tarcze muszą także posiadać należytą sztywność – co warunkuje utrzymanie geometrii płytki. Dla każdego cięcia tarczowego występuje typowy rozkład sił.

Podczas cięcia zazwyczaj zachodzi zależność $F_y > F_z > F_x$. Pomiędzy siłą promieniową (F_y) a siłą styczną (F_z) zachodzi przybliżony stosunek 1,2 -3:1. Proporcja ta zależy od narzędzia oraz stopnia jego zużycia, znaczące zwiększenie siły F_y wywołuje w ciętych płytkach zwiększone naprężenia. Nacisk jednostkowy na płytkę jest funkcją powierzchni styku narzędzia, a zatem wynika także ze sprężystości materiału półprzewodnikowego jak i narzędzia skrawającego lub ściernego.

Cięcie strugą wodną

AWJM (*Abrasive Water Jet Machine*) jest stosowane do cięcia licznego zbioru materiałów: od stali, poprzez polimery do ceramiki. Technologia cięcia wodnego charakteryzuje się zredukowanym stresem termicznym, zapewniając z zasady wydajne chłodzenie ciętego elementu. Obciążenia mechaniczne są jednak względnie duże, zwłaszcza dla niewielkich gabarytowo i masowo detali. Istotnym czynnikiem jest stałe zanurzenie detalu w zawieszaniu wody, ścierniwa i drobin przecinanego materiału, co prowadzi do znacznych zabrudzeń materiału. Aktualnie rozwijane są techniki MicroJet [5, 10] przeznaczone dla precyzyjnego cięcia m.in. krzemu, charakteryzują się dużą precyzją operowania oraz znacznie zmniejszonym oddziaływaniem sił podczas obróbki.

Z pewnego punktu widzenia można konwencjonalne cięcie ściernie krzemu podzielić na metody operowania luznym ziarnem ściernym oraz ziarnem związanym z narzędziem tnącym. W pewnym okresie rozwoju metod cięcia, odchodzono od stosowania luznego ziarna ściernego, aczkolwiek współcześnie jest to metoda stosowana. Metoda luznego proszku ściernego ma zastosowanie także jako cięcie strugą wodną, co jest klasyfikowane do obróbek niekonwencjonalnych, pomimo ewidentnego przekazywania energii poprzez pęd cząsteczek ścierniwa.

Metody konwencjonalne versus niekonwencjonalne (erozyjne)

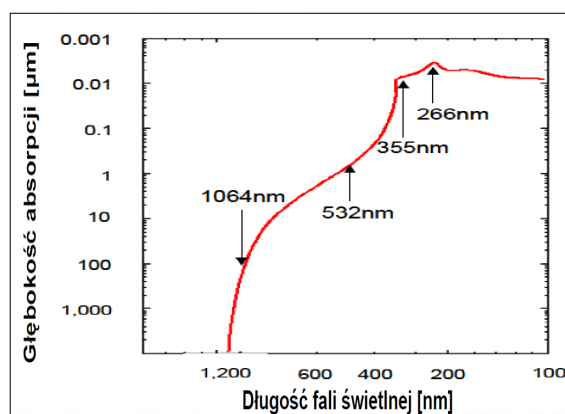
Warto odnieść się krytycznie do słuszności wielu przyjętych i utrwalonych w przemyśle fotowoltaicznym metod, nie zawsze adekwatnych do potrzeb. Takimi metodami są metody mechaniczne, zapożyczone z praktyki obróbek metali; współczesne tendencje zmierzają do stosowania dla krzemu obróbek hybrydowych bądź całkowicie innowacyjnych i niekonwencjonalnych. Istnieje wiele pomysłów metod cięcia krzemu. Przykładowo, podgrzewanie wiązką laserową do temperatury bliskiej temperaturze topnienia, celem zmniejszenia twardości materiału a następnie cięcie narzędziem mechanicznym.

Biorąc pod uwagę liczne nieuniknione wady wymienionych powyżej obróbek konwencjonalnych warto przyjrzeć się cechom obróbek niekonwencjonalnych.

W obróbkach erozyjnych (czyli niekonwencjonalnych, nietradycyjnych) do usuwania nadmiaru materiału (dla potrzeb kształtowania wymiarów i powierzchni) wykorzystuje się zjawiska fizyczne, chemiczne, elektrochemiczne typu fotonowego, jonowego, elektronowego oraz wyładowcze celem erodowania (*erosio* po łacinie znaczy ogryzać, żłobić) materiałów. Każda metoda erozyjna niesie zbiór czynników znacznie, względem skrawania, zróżnicowanych. Metody te dzieli się ze względu na kryteria postaci energii i rodzajów oddziaływań tej energii z materiałami.

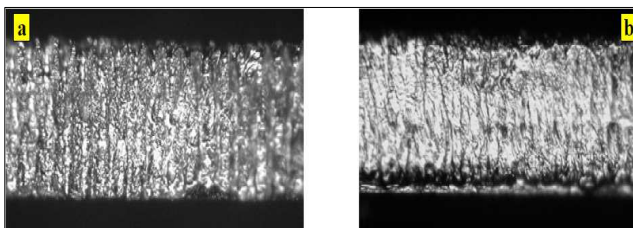
Cięcie plazmowe

Proces cięcia plazmowego polega na stapianiu i wyrzucaniu materiału ze szczeliny silnie skoncentrowanym plazmowym łukiem elektrycznym, jarzącym się między elektrodą a ciętym przedmiotem. Plazmowy łuk elektryczny jest silnie zjonizowanym gazem o dużej energii kinetycznej, przemieszczającym się z dyszy plazmowej, zawężającej się w kierunku szczeliny cięcia, z prędkością bliską prędkości dźwięku. Podstawowe parametry cięcia plazmowego to: natężenie prądu, napięcie łuku, prędkość cięcia, rodzaj, ciśnienie oraz natężenie przepływu gazu plazmowego, rodzaj i konstrukcja elektrody, średnica dyszy, położenie



Rys. 4. Głębokość absorpcji fali świetlnej rezonatora laserowego w krzemie

palnika względem ciętego przedmiotu. Temperatura strumienia plazmy mieści się w granicach $10000 \div 30000$ K i jest zależna od natężenia prądu, stopnia zwężenia łuku oraz rodzaju i składu gazu plazmowego. W typowym rozwiązaniu plazmotronu jako czynnik plazmotwórczy stosuje się



Rys. 5. Krawędź płytki krzemowej po cięciu laserem o okrągłym kształcie plamki (a); cięta plamką eliptyczną (b) [6]

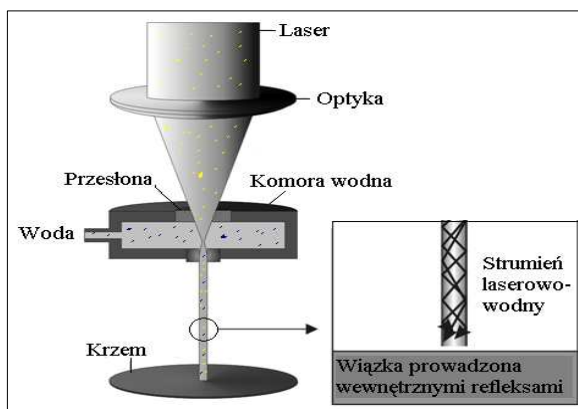
powietrze, rzadziej argon. W przeciwieństwie do argonu, będącego gazem inercyjnym, powietrze powoduje utlenianie, korozję i erozję elektrod.

Cechą charakterystyczną wyładowań łukowych jest istotny wpływ oparów pochodzących z elektrod na właściwości plazmy. Jest to spowodowane niskim potencjałem jonizacji metali, które są stosowane w

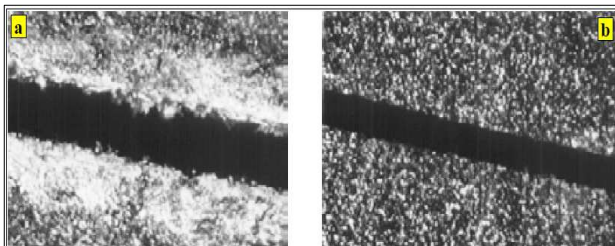
urządzeniach elektrotechnicznych. Dla przykładu wartość potencjału jonizacji dla żelaza wynosi 7,9 eV, miedzi 7,73 eV, srebra 7,58 eV, z kolei azotu 14,53 eV, tlenu 13,62 eV. Nawet niewielkie zanieczyszczenie materiałem elektrody (około 1%) istotnie zmienia wartość gęstości elektronów w wyładowaniu - w szerokim zakresie temperatur. A zatem ulega zmianie przewodność elektryczna, przewodność cieplna, temperatura, parametry równowagowe i termodynamiczne. W prowadzonych badaniach nad krzemem, cięcie plazmowe zostało uznane za nieodpowiednie.

Cięcie laserowe

Istnieje wiele odmian źródeł światła laserowego. Każda odmiana generacji laserowej ma swoje specyficzne widmo W zakresie cięcia krzemu najlepsze rezultaty (rys. 4) uzyskuje się w podczerwieni (najlepsza absorpcja), ale również w ultrafiolecie, niska absorpcja – gdyż pozwala to



Rys. 6. Zasada prowadzenia wiązki lasera w strudze wodnej



Rys. 7. Przekięta laserem płaszczyzna krzemu, bez strugi wodnej (a); z udziałem przewodzącej strugi wodnej (b); widoczne wyraźne różnice strefy wpływu ciepła [5]

na dokładną kontrolę penetracji materiału.

Cięcie laserem jest bezstykowe i nie przekazuje energii mechanicznej [7]. Przecinarki pozwalają na bardzo dokładne sterowanie procesem i dobór parametrów. Przykładowy wpływ geometrii i mocy wiązki, jej ogniskowania, na geometrię przecinanych krawędzi ukazuje rysunek 5.

Cięcie laserowo-wodne

Aktualnie najszersze horyzonty rysują się przed obróbką hybrydową laserowo-wodną. Zasada ubytkowania materiału jest identyczna jak w typowym laserze – sublimacja, przetop, ew. palenie (np. w przypadku stali konstrukcyjnych z użyciem O_2).

Dośkonały proces powinien składać się z cięcia połączonego z chłodzeniem; w typowej wycinarkę laserowej skojarzone z wiązką lasera chłodziwo, jako strumień np.

emulsji prowadzonej za promieniem lasera jest technicznie nierealne, nastąpi natychmiastowe odparowanie chłodziwa oraz w wypadku stali przemiana (np. martenzytyczna) – jedynymi metodami chłodzenia są silne strumienie gazów obojętnych. Rozwiązaniem dylematu są lasery o wysokiej częstotliwości i energii impulsów prowadzonych wewnątrz strugi wodnej. W obróbce tej zastosowano tunel wodny, który ma za zadanie prowadzenie wiązki, odprowadzenie ciepła, ochronę obrabianego obszaru przed gazami z zewnątrz. Jak dotąd ten rodzaj obróbki daje najlepsze efekty w przypadku płytek krzemowych, jest jednak powszechnie stosowany jedynie przez wysokorozwinięte ośrodki. Pomimo wysterowania procesu w kierunku szybkiego erodowania poprzez sublimację, w materiale krzemowym nadal istotnym obszarem pozostaje strefa wpływu ciepła. Najdoskonalsze metody (laserowo-strugowe) dają mniej niż 15 μm zdefektowanej po cięciu warstwy, oferując szybkość i stabilność procesu.

Cięcie elektroerozyjne

WEDM (Wire Electrical Discharge Machining) to technologia wykazująca istotne zalety pod względem dokładności i elastyczności [3]. Obecnie WEDM znajduje się w grupie najbardziej popularnych z pośród obróbek niekonwencjonalnych, umożliwia obrabianie materiałów bardzo twardych, kruchych oraz kompozytowych bez względu na ich strukturę i właściwości mechaniczne. Elektroerozja znalazła już szerokie zastosowanie w przemyśle przy cięciu tzw. materiałów trudno skrawalnych oraz o złożonych kształtach geometrycznych (np. stemple i matryce). WEDM zapewnia tolerancje w zakresie kilku mikrometrów. Jedną z przyczyn dużych oszczędności czasu jest wysoki poziom precyzji narzędzia w jego całym okresie eksploatacji. Fizyka cięcia jest zbliżona do cięcia plazmowego, są to wyładowania elektryczne, aczkolwiek tutaj zachodzi impulsowy transport energii w mikrowyładowaniach a w plazmotronach ciągły.

Badania związane z elektroerozyjnym przecinaniem płytek krzemowych nie są obszerne, pionierskie prace zalecały stosowanie drutu wolframowego o średnicy 0,12 mm. Współcześni badacze amerykańscy zalecają różne materiały, aczkolwiek brak jest kompleksowych publikacji i wyników.

Podsumowanie

Warto zwrócić uwagę na różnice pomiędzy cięciem plazmą a kolejną omawianą metodą - laserem. Zjawiska podczas szybkiego przejścia gęstego strumienia energii, takiego jak plazma, są różne od zjawisk podczas szybkiego przejścia wysokoenergetycznych impulsów lasera, chociaż obie metody nazywamy „termicznymi”. Cięcie plazmowe to przede wszystkim klasycznie rozumiane oddziaływanie termiczne (promieniowanie, konwekcja) i kinetyczne. Wpływ wiązki fotonów (brak masy spoczynkowej) jest odmienny od oddziaływania strumienia jonów, gdzie zachodzi oddziaływanie kinetyczne gazów oraz chemizm zachodzących reakcji.

Można zauważyć, że moc niezbędna do przecięcia danej grubości materiału krzemowego generowana przez przecinarkę plazmową jest mniejsza od mocy lasera, dla analogicznego przypadku. Przy założeniu, że oprogramowanie i sterowanie obu urządzeń ukazuje zbliżone do prawdziwych parametry, interpretacją tego faktu jest odmienna reakcja krzemu na strumień jonów lub fotonów.

Podsumowując, typowe wymagania dla nowoczesnego cięcia ogniw półprzewodnikowych to:

- minimalna szerokość szczeliny cięcia,
- odpowiednia szybkość cięcia materiału,
- niewielkie uszkodzenia w objętości struktury krystalicznej,
- zminimalizowane naprężenia mechaniczne,
- zminimalizowane naprężenia cieplne, chłodzenie,
- właściwa geometria uzyskiwanych płytek, brak wykruszeń,
- uzyskiwanie oczekiwanej struktury geometrycznej krawędzi,
- łatwość eksploatacji obrabiarki,
- możliwość odzyskiwania odpadów.

W ramach badań własnych oraz teoretycznych studiów literaturowych wywnioskowano jako najodpowiedniejszą obróbkę laserową i laserowo-wodną, co wynika z analizy fizyki powierzchni ogniw oraz wpływu strumienia energii obróbkowej na kluczowe parametry eksploatacyjne ogniw.

Obrabiarki i proces zmiany kształtu materiałów, w każdej technologii operowania tworzywem są kluczem do sukcesu. Pozyskiwanie surowca czy jego przerób również są istotne, ale to obróbka wnosi do procesu największe straty i zyski zarazem.

LITERATURA:

- [1] Ashcroft N.W., Mermin N.D.: Fizyka ciała stałego. PWN, Warszawa 1986.
- [2] PN-1997/M-04250, Warstwa wierzchnia. Terminologia.
- [3] 100 Poroś D.: Dobór elektrody drutowej do wycinania elektroerozyjnego materiałów trudno obrabialnych. Rozprawa doktorska, Politechnika Wroclawska, Wrocław 2007.
- [4] Wells A.B., Subrahmanyam P.K.: Machine for precision high-speed cutting of semiconductor wafers. Electro Scientific Industries, Inc., Portland 2003.
- [5] Richerzhagen B.: The waterjet-guided laser in wafer cutting. Parc Scientifique A, Switzerland 2004.
- [6] Yoo W. S., Fukada T., Yokoyama I., Kang K., Takahashi N.: Thermal Behavior of Large-Diameter Silicon Wafers during High-Temperature Rapid Thermal Processing in Single Wafer Furnace. The Japan Society of Applied Physics, Tokyo 2002.
- [7] Cosford L., Swift V.: Laser cutting of silicon wafers. Enabling Technology, 2008.
- [8] Kula P.: Inżynieria warstwy wierzchniej. Monografie, Łódź 2000.
- [9] Kaczmarek J.: Podstawy obróbki wiórowej, ścierniej i erozyjnej. WNT, Warszawa 1970.
- [10] Ruszaj A., Gawlik J., Skoczypiec S.: Stan badań i kierunki rozwoju wybranych niekonwencjonalnych procesów wytwarzania. Inżynieria Maszyn – rok 14, zeszyt 1, Wydawnictwo NOT, Wrocław 2009.
- [11] Chojnacki J.: Elementy krystalografii chemicznej i fizycznej. PWN, Warszawa 1971.
- [12] Many A., Goldstein Y., Grover N.B.: Semiconductor surfaces. J. Wiley, New York 1965.