

Tendencje technologiczne w produkcji płytek krzemowych

WSTĘP

Podstawowym półproduktem dla przemysłu przyrządów półprzewodnikowych są płytki krzemowe, otrzymywane z monokryształów krzemu przez cięcie, szlifowanie i polerowanie. Wytwarzanie ich wkroczyło w ostatnim dziesięcioleciu w fazę produkcji masowej.

Za rozwojem technologii monokrysztalizacji, pozwalającej wytwarzać coraz większe monokryształy, nadążyć musiała technologia ich cięcia oraz technologia szlifowania, trawienia i polerowania płytek. Postęp w zakresie tych procesów, zwanych skrótowo obróbką, umożliwił wytwarzanie coraz większych płytek przy relatywnie niższych /w odniesieniu do jednostki powierzchni/ kosztach wytwarzania.

W artykule niniejszym omówiono aktualny stan technologii obróbki, tendencje rozwoju oraz ekonomiczne uwarunkowania i konsekwencje zachodzących zmian.

1. WYMIARY PŁYTEK, CENY

Ilustracją wzrostu podstawowych wymiarów płytek produkowanych w okresie 1962 - 1973 jest wykres przedstawiony na rys. 1 [1] .

Równolegle ze wzrostem średnicy płytki rosła również jej grubość. Przyczyny tego zjawiska - niekorzystnego z punktu widzenia wykorzystania krzemu - są ściśle technologiczne. Zwiększenie grubości płytki jest jak dotychczas jedyną pewną metodą zmniejszenia jej odkształceń w procesach wysoko temperaturowych.

W latach 1973-1975 nastąpiło dalsze zwiększenie przeciętnej średnicy płytki. Ocenia się, że aktualnie średnią wartością jest dla przemysłu amerykańskiego średnica 3 cali /76 mm/, z utrzymującą się tendencją dalszego wzrostu. Przejście z płytek 3-calowych /76 mm/ na 4-calowe /102 mm/ dokonuje się już jednak wolniej.

Zgodnie z przewidywaniami [2] w ciągu pięciu lat płytka o średnicy 100 mm stanie się wyrobem dominującym. I tak, w roku bieżącym przewidywany udział płytek o średnicy 100 mm w produkcji f-my Monsanto wynosi 15-20%, a w produkcji f-my Wacker Chemical Corporation - 25% [2] .

Celowość ekonomiczna produkcji większych płytek wynika oczywiście z możliwości potania produkcji elementów półprzewodnikowych.

Przewiduje się, że masowe zastosowanie w produkcji płytek o średnicy 100 mm spowoduje obniżenie średniej ceny struktury /chipu/ o 20%. Szybki rozwój masowej produkcji płytek o średnicy 100 mm wydaje się więc prawdopodobny. Przewidywania te dotyczą bardzo niedalekiej przyszłości i winny być brane pod uwagę nawet w krótko-terminowych planach rozwoju krajowego przemysłu materiałów i elementów półprzewodnikowych.

Zmianę średniej ceny płytki polerowanej w latach 1963-1973 przedstawiono na rys. 2 [1]. Oprócz spadku cen krzemu monokrystalicznego o szybkim tempie obniżania się ceny płytki decydowało zwiększenie skali produkcji i znaczny postęp w metodach obróbki. Tempo to uległo w latach 1973-75 znacznemu zahamowaniu, jednakże sądzić można, że fakt ten uwarunkowany był w znacznym stopniu zjawiskami o charakterze ogólnogospodarczym /zwyżka cen energii, płac itp./.

2. STANDARYZACJA PŁYTEK

Wzrost w ostatnim pięcioleciu obrotów handlowych płytkami stworzył tendencje do standaryzacji metod obróbki i parametrów płytek, ponieważ zbyt wielka ilość ich odmian stała się hamulcem w rozwoju produkcji wielkoseryjnej [3-5].

Producenci elementów półprzewodnikowych na ogół niechętnie zgadzają się na zmiany w technologii obróbki płytek, obawiając się kłopotów na ustabilizowanych liniach produkcyjnych.

W latach gwałtownego rozwoju przemysłu przyrządów półprzewodnikowych uruchomienie każdej nowej linii powodowało ponadto z reguły zgłoszenie nowych wymagań i powstanie nowej odmiany płytki, często tylko w szczegółach obróbki różniącej się od płytek już produkowanych. W rezultacie na przełomie lat 60-tych i 70-tych wzrastała w sposób niekontrolowany ilość odmian płytek, co stwarzało niekorzystną sytuację dla ich producentów, a w przyszłości również dla odbiorców.

W roku 1973 powstały niedobory płytek krzemowych na rynku, co doprowadziło do konfrontacji stanowisk producentów i odbiorców płytek. Z analizy możliwości zwiększenia produkcji wyniknęła konieczność standaryzacji wymiarów geometrycznych płytek, orientacji krystalograficznej, sposobu obróbki strony biemej, z wyłączeniem jednak parametrów elektrycznych materiału.

O tym, jak wielka była skala problemu, świadczyć może fakt, że w wyniku dokonanej analizy największy światowy producent płytek, firma Monsanto zmniejszyła ilość produkowanych odmian płytek z 300 do 12 [6]. Należy jednak pamiętać, że są to odmiany różniące się sposobem obróbki, a nie z właściwościami materiału.

W tabeli 1 przedstawiono wielkości standardowych parametrów według firmy Monsanto.

Postęp, jaki osiągnięto w standaryzacji w latach 1973-75, jest bardzo duży. Przewidywać można, że w najbliższym pięcioleciu produkcja płytek wg opracowanych standardów obejmie ponad połowę produkcji światowej. Dodatkowym czynnikiem działającym w kierunku przyspieszenia tego procesu jest automatyzacja niektórych operacji produkcji elementów półprzewodnikowych.

Nie wyczerpując bardzo obszernego problemu standaryzacji należy zwrócić uwagę, że ujednoczenie - oczywiście w miarę możliwości technologicznych - metod obróbki

oraz parametrów geometrycznych płytek stanowi ważny element, decydujący o możliwości lepszego wykorzystania parku maszynowego. Problemy te są bardzo aktualne również w krajowym przemyśle materiałów półprzewodnikowych.

Tablica 1

WIELKOŚCI STANDARDOWYCH PARAMETRÓW PŁYTEK KRZEMOWYCH PRODUKOWANYCH W F-MIE MONSANTO W 1975 ROKU^x

	Płytki 2"	Płytki 3"
Średnica, mm	50,80±0,38	76,20±0,63
Grubość, μm	279,4	381,0
Wygięcie maximum, μm	38,1	50,8
Błąd płaskorównoległości maximum, μm	12,7	25,4
Szerokość ścięcia bazowego, mm	14,29-17,46	19,05-25,40
Szerokość znacznika, mm	6,35-9,52	9,52-12,70
Orientacja ścięcia bazowego dla płytek /111/	110	110
Orientacja ścięcia bazowego dla płytek /100/	110	110

^xWielkości podane w μm i mm przeliczono z wielkości podanych w calach.

3. URZĄDZENIA I PROCESY TECHNOLOGICZNE

Mówiąc o wytwarzaniu płytek wymienia się tradycyjne cztery operacje: cięcie, szlifowanie, trawienie i polerowanie. Cięcie i szlifowanie są operacjami kształtowania płytki, celem trawienia jest usunięcie warstwy uszkodzonej, polerowanie nadaje końcówką, wysoką gładkość strony czynnej płytki.

W artykule przeglądowym z roku 1970 [7] wyrażono pogląd, że z wielu względów pożądanym byłoby pominięcie operacji szlifowania, jednakże wymagałoby to uzyskania po cięciu parametrów geometrycznych wg wymagań dla płytek polerowanych. Autorzy [7] wyrazili przekonanie, że realizacja tego sposobu obróbki możliwa jest tylko w warunkach laboratoryjnych.

Tymczasem postęp w konstrukcji maszyn do precyzyjnego cięcia krzemu był taki szybki, że już w parę lat później schemat obróbki cięcie - trawienie - polerowanie stał się powszechną praktyką produkcyjną dla większości wyrobów. Operację szlifowania stosuje się dla płytek o szczególnie wysokich wymaganiach geometrii oraz dla tych, dla których szlifowanie jest operacją końcową.

Z firm, które wyspecjalizowały się w produkcji maszyn do cięcia dużych monokryształów wymienić można:

- Meyer-Burger/Szwajcaria/, model TS 21 przystosowany do cięcia monokryształów o średnicy 100 mm i długości 500 mm,
- Silicon Technology Corporation /USA/, model Standard umożliwiający cięcie monokryształów o średnicy 102 mm i długości 610 mm,
- Crouzet/Francja/, model 100- średnica 100 mm, model 150- średnica monokryształu 150 mm, długość 500 mm.

Wszystkie wymienione wyżej typy maszyn posiadają urządzenia do automatycznego odbioru płytek. Maszyna f-my Meyer-Burger model TS 21 posiada dodatkowo przystawkę do automatycznego pomiaru grubości i błędu płaskorównoległości płytek oraz ich segregacji wg tych wielkości. W maszynach firmy Crouzet monokryształ mocowany jest pionowo, w pozostałych dwóch - poziomo. Charakterystyczną cechą maszyny f-my STC /rys. 3/ jest ruchomy bęben z tarczą tnącą, która podczas cięcia zagłębia się w nieruchomy monokryształ.

We wszystkich tych urządzeniach elementem tnącym są tarcze z blachy stalowej z nasypem diamentowym na obrzeżu centrycznie umieszczonego okrągłego wycięcia. Wprowadzenie tego systemu, zwanego cięciem wewnętrzną średnicą /ang. Inner Diameter Slicing/, we wczesnych latach sześćdziesiątych doprowadziło do radykalnego zmniejszenia strat materiału przy cięciu, chociaż nadal są one duże. Straty powstają głównie na skutek fizycznego rozkruszania materiału przez ostrze tnące /w zależności od średnicy monokryształu 200-300 μm na płytkę/ oraz na tzw. końcówki. Ten drugi rodzaj strat jest oczywiście znacznie mniejszy w urządzeniach przystosowanych do cięcia długich monokryształów.

Zastosowanie konstrukcji zmniejszającej wibracje oraz zwiększenie precyzji wykonania elementów maszyn pozwoliło na znaczne zwiększenie szybkości cięcia - a więc wydajności jednostkowej, oraz - co ma znaczenie podstawowe - precyzji cięcia. Wymienieni uprzednio producenci gwarantują możliwość cięcia płytek z odchyleniem od nominalnej grubości $\pm 5 \mu\text{m}$ i błędzie płaskorównoległości nie przekraczającym $5 \mu\text{m}$.

Przy użyciu najlepszych maszyn możliwe jest więc obecnie uzyskanie parametrów geometrycznych płytek przewyższających po cięciu parametry przyjęte aktualnie jako standardowe dla płytek polerowanych /patrz Tabl.1/.

Oprócz precyzji cięcia o jakości maszyny decyduje jej niezawodność i średnia używana szybkość cięcia /wydajność/. Ten ostatni parametr zwykle nie bywa jednoznacznie określany w prospektach.

Dzieje się tak dlatego, że nawet przy użyciu maszyn wysokiej klasy cięcie pozostaje operacją trudną, w której bardzo wiele zależy od operatora. Utrzymywanie właściwego stanu ostrza, klasyfikacja przyczyn występowania odchylenia od normy w pracy maszyny, umiejętność przewycięzania ich - wymaga dużej wiedzy fachowej i precyzji.

W nowych konstrukcjach szlifierek i polerek zaznaczyły się również tendencje do budowy maszyn większych, o dużej precyzji obróbki i wyższych wydajnościach jednostkowych.

Poniżej przedstawiono podstawowe dane techniczne polerek produkowanych przez firmy Siltec /USA/, Peter Wolters /RFN/, Speedfam /USA/.

	Siltec 3210 A	Peter Wolters Microlap FL12P	Speedfam 32 SPAW
Średnica tarczy polerskiej	914 mm	1290 mm	813 mm
Średnica krążka	266, 305, 355 mm	484 mm	305 mm
Ciężar krążka	ca 5 kg dla 3 typów krążków	ca 20 kg	ca 8 kg
Wymuszony napęd krążków	tak	tak	nie
Max. nacisk na krążek	480 kg	400 kg	100 kg

W stosunku do stosowanych powszechnie parę lat temu maszyn o średnicy tarczy ca 600 mm, krążków - ca 200 mm, widać znaczne zwiększenie skali. Jeśli chodzi o polerkę f-my Peter Wolters, to budzą się nawet wątpliwości, czy zbudowanie maszyny o tak wielkich krążkach jest celowe ze względu na trudności manipulacyjne.

Na rysunku 4 przedstawiono otwartą polerkę f-my Siltec. W modelu tym zastosowano wymuszony napęd krążków, przeponowe chłodzenie tarczy i krążków, miernik temperatury, układ umożliwiający termostatowanie procesu oraz 3 układy dozujące do mieszanin polerskich. W czasie procesu polerowania płytki zabezpieczone są przed zanieczyszczeniami z zewnątrz. Jako mieszanin polerskich do polerowania krzemu powszechnie stosuje się alkaliczne zawiesiny krzemionkowe.

Trawienie płytek należy do operacji trudnych, stwarzających zagrożenie dla personelu. Dla płytek o średnicy 76 mm i większych trudno jest poza tym zapewnić przy użyciu dotychczas stosowanych metod zadowalającą powtarzalność procesu. Próby automatyzacji tej operacji zmierzają do stworzenia konstrukcji z zastosowaniem rozprysku mieszaniny trawiącej, o zasadach analogicznych, jak trawiarki do blach i obwodów drukowanych. Trawiarki takie produkowane są przez firmy DEA /USA/ oraz In-Line Technology and Inc. /USA/.

Trudny do rozwiązania problem stanowi kwestia zagospodarowania ścieków po trawieniu. Nie opracowano dotychczas metody regeneracji stosowanych obecnie mieszanin, a neutralizacja ich i odprowadzanie do zbiorników wodnych jest ze względu na ochronę środowiska rozwiązaniem wysoce niezadowalającym. Rozwiązanie problemu polega być może na zastosowaniu trawienia gazowego, chociaż wydaje się to narazie zbyt kosztowne. Inna możliwość związana jest z dalszym upraszczaniem schematu obróbki i całkowitą rezygnacją z trawienia, poprzez zastąpienie tej operacji dwustronnym polerowaniem mechaniczno-chemicznym. Jeżeli zostaną skonstruowane maszyny umożliwiające realizację tego procesu bez uciążliwego odklejania i przyklejania płytek, to rozwiązanie takie wydaje się możliwe i celowe ekonomicznie.

Znaczne postępy poczyniono w dziedzinie automatyzacji operacji pomocniczych, takich jak mycie płytek, sortowanie według wymiarów geometrycznych, według oporności itp. Można się spodziewać, że w tej dziedzinie najbliższe lata przyniosą postępy jeszcze szybszy, zgodnie z analogiczną tendencją do automatyzacji zbliżonych operacji manualnych w procesach produkcji elementów półprzewodnikowych. Charakterystyczna dla przemysłu półprzewodnikowego szybka modernizacja i automatyzacja maszyn stanowi jeden z głównych czynników decydujących o tempie obniżania kosztów produkcji.

Potaniecie produkcji płytek osiągnięto również przez eliminację drogich materiałów pomocniczych, jak np. niektórych rozpuszczalników organicznych do mycia i suszenia. Wzrost cen rozpuszczalników, związany z podwyżką cen ropy naftowej, spowodował rozwój rozwiązań technologicznych, umożliwiających mniejsze ich zużycie.

Przyklejanie monokryształów do cięcia za pomocą żywic epoksydowych oraz szlifowanie płytek bez przyklejania przy użyciu zawiesin wodnych /a nie olejowych/ umożliwiło mycie płytek po obu tych operacjach z zastosowaniem kąpeli: woda z detergentem - woda. Z tych samych względów rozpowszechnia się suszenie płytek po trawieniu i polerowaniu za pomocą wirówek, zamiast powszechnie uprzednio stosowanego suszenia w parach rozpuszczalników. Nie udało się dotychczas całkowicie wyeliminować rozpuszczalników organicznych z procesów mycia po polerowaniu, ponieważ nadal powszechnie stosuje się różnego rodzaju woski do przyklejania płytek na krążki polerskie.

Podjęto również na skalę przemysłową regenerację płytek zdyskwalifikowanych po różnych operacjach technologicznych, np. po epitaksji, dyfuzji itp. w zależności od potrzeby płytki regenerowane poddawane są operacjom trawienia i polerowania, bądź szlifowania, trawienia i polerowania i sprzedawane po nieco niższej od płytek "oryginalnych" cenie. Oczywiście są one nieco cieńsze. Można przewidzieć, że regeneracja płytek stosowana będzie coraz bardziej powszechnie, ponieważ opłacalność tej metody rośnie wraz ze średnicą płytki.

Omawiając zmiany technologiczne, w rezultacie których uzyskano znaczne potaniecie produkcji, zaznaczyć należy, że jednocześnie następował stały wzrost jakości płytek. Wymagania dotyczące parametrów geometrycznych oraz doskonałość powierzchni polerowanej zwiększały się systematycznie w ciągu kilku ostatnich lat i można przewidzieć, że w związku z miniaturyzacją przyrządów półprzewodnikowych proces ten będzie postępował nadal.

4. KOSZTY OBRÓBKI

Dla ekonomicznej oceny przebiegów technologicznych wygodnie jest przedstawić koszt wyprodukowania płytki następującym wzorem:

$$K = \frac{K_{Si}/N_{c1} + N_{c2} + N_{szl} + N_{tr} + N_{pol} + G/}{U_c \cdot U_{szl} \cdot U_{tr} \cdot U_{pol}} +$$

$$+ \frac{K_c}{U_c \cdot U_{szl} \cdot U_{tr} \cdot U_{pol}} + \frac{K_{szl}}{U_{szl} \cdot U_{tr} \cdot U_{pol}} +$$

$$+ \frac{K_{tr}}{U_{tr} \cdot U_{pol}} + \frac{K_{pol}}{U_{pol}}$$

gdzie:

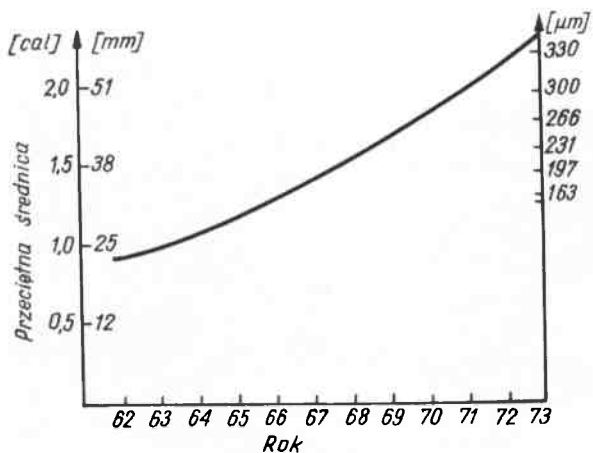
K	- bezpośredni koszt wyprodukowanej płytki /z pominięciem kosztów wydziałowych, zakładowych i innych pośrednich/. Pominięcie kosztów pośrednich jest dla obliczeń technologicznych dopuszczalne, ponieważ nie zmieniają się one lub zmieniają się tylko nieznacznie wraz ze zmianą przebiegów technologicznych,
K_{Si}	- koszt monokryształu krzemu o długości $l \mu m$,
N_{ci}	- naddatek cięcia, odpowiadający stracie materiału skruszonego go przez ostrze piły / μm /płytkę/,
N_{c2}	- naddatek cięcia spowodowany stratą końcówek / μm /płytkę/,
N_{szl}	- naddatek szlifowania / μm /płytkę/,
N_{tr}	- naddatek trawienia / μm /płytkę/,
N_{pol}	- naddatek polerowania / μm /płytkę/,
G	- grubość końcowa płytki polerowanej / μm /,
$K_c, K_{szl}, K_{tr}, K_{pol}$	- odpowiednio koszt cięcia, szlifowania, trawienia, polerowania w stosunku do jednej płytki poddanej określonej operacji,
$U_c, U_{szl}, U_{tr}, U_{pol}$	- uzyski kolejnych operacji, odpowiednio cięcia, szlifowania, trawienia, polerowania - definiowane jako stosunek płytek dobrych po danej operacji do ilości poddanych tej operacji /w operacji cięcia - do ilości teoretycznej płytek/.

Pierwszy człon wzoru przedstawia koszt materiału podstawowego, pozostałe człony - koszty związane z wykonaniem kolejnych operacji. Przy dokładniejszych rozliczeniach należy koszty operacyjne przedstawić w rozbięciu na części składowe, np.:

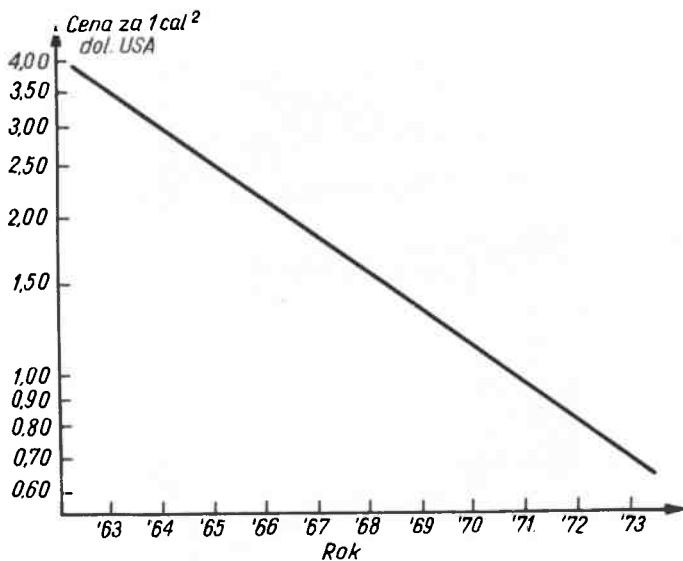
$$K_{szl} = \text{koszt pracy bezpośredniej} + \text{amortyzacja} + \text{materiały pomocnicze} + \text{energia itp.}$$

W praktyce przemysłowej rozliczenia kosztów są z konieczności prowadzone z pewnym zbliżeniem, w związku z czym drobne różnice technologiczne nie znajdują odbicia w cenie płytki. Prawidłowe planowanie przebiegów technologicznych wymaga jednakże bardzo dokładnego obliczenia wszystkich części składowych kosztów, tym bardziej, że ocena, czy planowana zmiana przyczyni się do obniżenia, czy podwyższenia kosztu nie zawsze jest oczywista. Przykładowo - produkcja płytek cieńszych wydaje się dla producenta korzystna ze względu na lepsze wykorzystanie monokryształu. Ocena celowości proponowanej zmiany możliwa jest jednak dopiero po obliczeniu kosztu całego witego, ponieważ zmniejszenie grubości płytek spowoduje jednocześnie spadek uzysków operacyjnych.

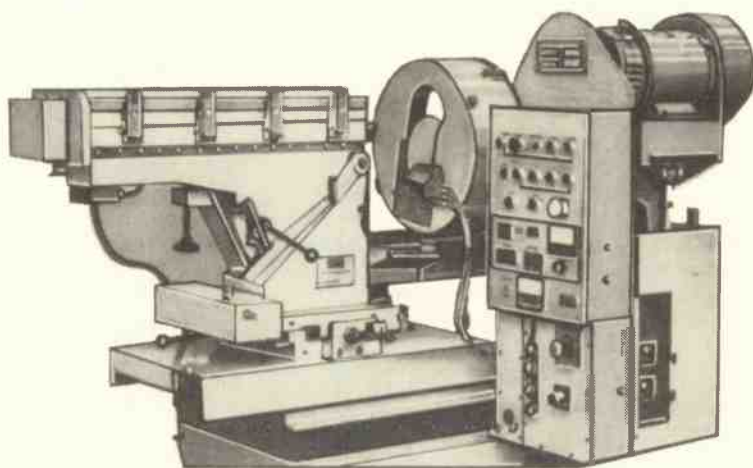
Znajomość współzależności poszczególnych pozycji kosztów jest również niezbędna do działania w zakresie analizy wartości produktu, w tym głównie do badania możliwości obniżenia kosztów produkcji oraz do właściwego planowania inwestycji modernizacyjnych. I tak np. z przedstawionego wzoru, nawet bez podstawiania danych liczbowych, wywnioskować można, że ekonomicznie krytyczną operacją jest cięcie. Zastosowanie precyzyjnych pił umożliwiających rezygnację ze szlifowania pociąga za sobą znaczne zmniejszenie kosztów materiału podstawowego i kosztów operacyjnych. Stąd też o możliwym do osiągnięcia minimalnym poziomie kosztów decyduje jakość techniczna maszyn do cięcia.



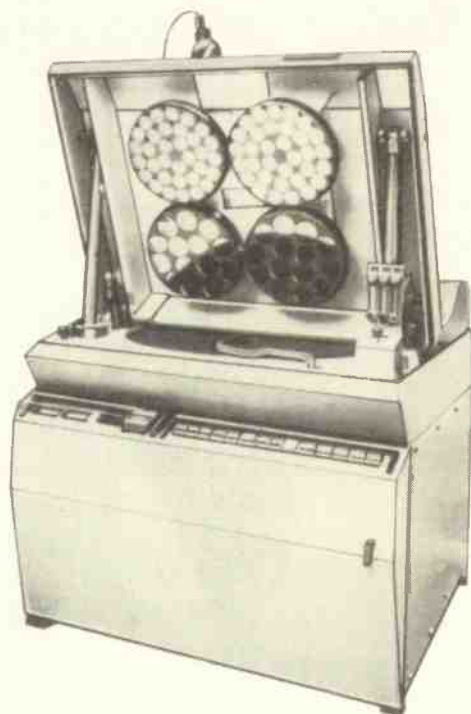
Rys. 1. Przeciętne wymiary krzemowych płytek polerowanych wyprodukowanych w latach 1962-1973 /z wyłączeniem płytek do elementów mocy 750 V/



Rys. 2. Średnia cena jednego cala kwadratowego płytki krzemowej polerowanej w latach 1963-1973



Rys. 3. Piła do cięcia monokryształów krzemu produkcji firmy STC



Rys. 4. Polerka firmy Siltec, Model 320A-14

O prawidłowości obliczeń planowanych przebiegów technologicznych decyduje w dużym stopniu dostępność dokładnych danych statystycznych przebiegów realizowanych. Przy wzroście skali produkcji ilość danych, które winny być rejestrowane i przetwarzane, rośnie, uzasadniając celowość zastosowania elektronicznej techniki obliczeniowej /ETO/.

Zastosowanie ETO w przemyśle półprzewodnikowym wydaje się szczególnie celowe ze względu na ułatwienie oceny wpływu poszczególnych faz produkcji płytek na uzyski i jakość wytwarzanych z nich elementów półprzewodnikowych.

UWAGI KOŃCOWE

Celem niniejszego artykułu było zwrócenie uwagi na problemy technologiczne i ekonomiczne związane z wytwarzaniem płytek krzemowych.

Obróbka - być może dlatego, że reprezentuje operacje technologiczne znane od dawna - skupia na sobie znacznie mniej uwagi niż historycznie młodsze operacje, np. monokryształizacja lub epitaksja. Prowadzi to do niedoceniań ekonomicznej wagi obróbki oraz związanych z nią potrzeb inwestycyjnych. Należy jednakże zaznaczyć, że oszczędności inwestycyjne, czynione kosztem maszyn do obróbki, są oszczędnościami pozornymi; im niższy bowiem poziom techniczny tych maszyn, tym więcej potrzeba krzemu /wyższe straty przy obróbce/, a tym samym urządzeń do monokryształizacji.

W przedstawionym wyżej przeglądzie tendencji technologicznych starano się pokazać ich aspekt ekonomiczny, w przekonaniu, że obniżenie kosztów produkcji płytek będzie - tak samo jak obniżenie kosztów wytwarzania innych półproduktów i produktów finalnych przemysłu półprzewodnikowego - głównym zadaniem nadchodzącego pięcioletnia.

Literatura

1. Beyen W. I., Cecil O. B.: Silicon material requirements for future electronic device technology. *Semiconductor Silicon 1973*. H. R. Huff, R. R. Burgess Editors, Princetown, N. J. 1973
2. Curtis J.: Four inch wafers seen as standard in five years. *Electronics* 48, 24, 1975
3. Carlson J. W.: Industry standardization of silicon substrates. *Solid State Technology* 16, 9, 1973
4. Townley D. C.: Optimum crystallographic orientation for silicon device fabrication. *Solid State Technology* 16, 1, 1973
5. Moore G. E., Sr. Law T.: Worldwide wafer standardization - fact or fancy?. *Solid State Technology* 18, 2, 1975
6. Sideris G.: Business boom creates parts pinch. *Electronics* 46, 8, 1973
7. Blake L. H., Mendel E.: Chemical-mechanical polishing of silicon. *Solid State Technology* 13, 1, 1970.
8. Kachajian G. S.: A system approach to semiconductor slicing to improve wafer quality and productivity. *Solid State Technology*
9. Malinin A. J.: Obzor osnovnykh problem i glavnykh napravlenij soviershenstvovanija tiechnologii izgotovlieniija kriemievych podložek. Referat wygotoszony na IV posiedzeniu Centrum Koordynacyjnego Materiałów Półprzewodnikowych, 1975
10. Roe C.: Trends in semiconductor materials production. *Electronic Packaging and Production* 14, 4, 1974
11. Steen L. S.: New trends in wafer processing techniques: an overview. *Electronic Packaging and Production* 14, 4, 1974
12. Lawrence J. E.: The case for reclaim wafers. *Electronic Packaging and Production* 14, 1, 1974
13. Prospekty firm: Silicon Technology Corporation /USA/, Siltec Corporation /USA/, Speedfam Corporation /USA/, Crouzet /Francja/ Meyer-Burger AG /Szwajcaria/, Peter Wolters /RFN/
14. Geckle R. A.: Cleaning procedures and solvent for semiconductors and PC boards. *Electronic Packaging and Production* 15, 7, 1975