

BADANIE MIKROPOROWATOŚCI POLEROWANEJ POWIERZCHNI PŁYTEK KRZEMOWYCH W CELU DOSTOSOWANIA SPOSOBU ICH WYTWARZANIA DO NOWYCH WYMAGAŃ JAKOŚCIOWYCH

Bronisław Piątkowski¹, Sławomir Szymański¹

¹InstituT Technologii MateriałóW ElekTronicznych
ul. Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa; e-mail: bronislaw.piatkowski@itme.edu.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki badań nad uzyskaniem powierzchni polerowanych płytek krzemowych (*silicon polished wafers*) o mikrochropowatości (*micro-roughness*) mniejszej od 4 Å. Dla osiągnięcia odpowiedniej gładkości konieczne było wykonanie badań nad procesami polerowania na tkaninach polerskich (*polishing pads*) nowej generacji z zastosowaniem nowych środków polerskich (*polishing slurries*). Do badań wytypowano tkaniny (*polishing pads*) firm Rodel o symbolach *regular*, SPM 1300, firmy TK o symbolu *poretex* oraz firmy Fujimi Surfin 000. Do polerowania stosowano środki polerskie Firmy Nalco o symbolach LS, 8020 oraz 2354. W wyniku badań przeprowadzonych przy zastosowaniu nowych materiałów opracowano technologię zapewniającą odpowiednią gładkość powierzchni polerowanych płytek krzemowych.

Słowa kluczowe: płytki krzemowe, mikrochropowatość powierzchni

Study of micro-roughness of the polished surface of silicon wafers aimed at fulfilling the new quality requirements

Abstract: This paper presents the results of research directed toward achieving a polished surface of silicon wafers that would have micro-roughness lower than 4 Å. In order to obtain the required smoothness it was necessary to carry out research on the process of polishing on new generation polishing pads with the use of new polishing slurries. The polishing pads chosen for the research were produced by Rodel ("regular", SPM 1300), TK ("poretex") and Fujimi (Surfin 000). The polishing slurries were made by Nalco (LS, 8020 and 2354). As a result of the research, for the purpose of which the above mentioned new generation materials were used, we have worked out a technology that ensures the required surface smoothness of the polished silicon wafers.

Key words: silicon wafers, surface micro-roughness

1. WPROWADZENIE

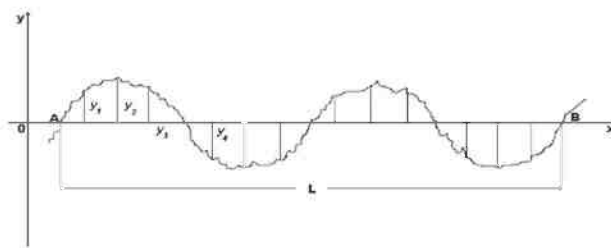
Jedną ze specjalności Instytutu Technologii MateriałóW ElekTronicznych jest opracowywanie technologii wytwarzania płytek krzemowych o parametrach wymaganych przez odbiorców na całym świecie (w większości są to ośrodki naukowe). Opracowane technologie są wdrażane do produkcji, a wykonane w czasie wdrożeń płytki sprzedawane. Aby dostosować jakość tych wyrobów do stale rosnących wymagań konieczne jest systematyczne prowadzenie prac badawczo-technologicznych.

Bardzo szybki postęp w przemyśle elektronicznym, np. wyższa skala integracji, wprowadzenie *bondingu*, produkcja czujników, wymaga stosowania materiałów o nowych parametrach jakościowych. Nowe wymagania dla dostarczanych płytek dotyczą parametrów geometrycznych oraz jakości polerowanej powierzchni. Produkowane przez ITME płytki charakteryzują się dobrymi parametrami geometrycznymi i odpowiednią czystością. Jedynym parametrem w wykonywanych w ITME płytkach, który odbiega od obecnie wymaganych standardów to mikrochropowatość powierzchni. Wielkość tego parametru ma szczególne znaczenie przy produkcji układów scalonych, gdzie coraz mniejsze wielkości elementów nanoszonych wymagają coraz to gładziej powierzchni, oraz przy łączeniu termicznym płytek (*bonding*) gdzie mniejsza mikrochropowatość poprawia łączenie powierzchni. Miarą mikrochropowatości jest parametr Ra. Dotychczas uzyskanie gładkości określanej za pomocą tego parametru na poziomie (5 - 10) Å, a o takiej chropowatości płytki są produkowane, uważano za wystarczające. Obecnie odbiorcy wymagają, aby wielkość Ra była znacznie niższa i wynosiła (2 - 3) Å, a w literaturze spotyka się informacje o uzyskiwaniu nawet 0,5 Å [2 - 4]. Wielkość mikrochropowatości powierzchni zależy

głównie od sposobu polerowania płytek oraz od mycia płytek po polerowaniu – podczas mycia może zachodzić trawienie powierzchni co zwiększa jej mikrochropowatość [1]. Przeprowadzono próby polerowania i mycia stosując dotychczas wykorzystywane materiały polerskie i metody mycia w celu obniżenia wielkości parametru Ra określonej powierzchni płytek. Próby te nie przyniosły jednak pozytywnych rezultatów. Stwierdzono, że jedynie wymiana materiałów polerskich może wpłynąć na obniżenie Ra. Wraz ze zwiększonymi wymaganiami odnośnie jakości płytek, producenci materiałów dla przemysłu elektronicznego wprowadzili na rynek nową generację materiałów, które przy odpowiednio dobranej technologii zapewniają uzyskiwanie odpowiedniej powierzchni. Uzyskanie tak małej mikrochropowatości jest zagadnieniem bardzo trudnym do osiągnięcia, jednak dla dostosowania się do wymagań światowych konieczne było podjęcie takich badań. W ITME dysponowano pewną ilością materiałów polerskich nowej generacji, ale nigdzie w literaturze, ani w folderach producentów materiałów nie ma informacji jak dobierać te materiały i jaką technologię należy stosować dla uzyskania odpowiedniej jakości powierzchni. Każdy producent płytek sam wykonuje takie badania dla swoich potrzeb. Konieczne więc było opracowanie w ITME zupełnie nowej technologii dostosowanej do posiadanych przez nas maszyn i materiałów polerskich.

2. DEFINICJA MIKROCHROPOWATOŚCI POLEROWANEJ POWIERZCHNI

W skali nanometrycznej na wypolerowanej powierzchni płytki półprzewodnikowej występują nierówności w postaci występow i wgłębień. Mikrochropowatość płytek półprzewodnikowych w zależności od sposobu polerowania może wynosić od 1 Å do 100 Å. Miarą mikrochropowatości płytek jest wielkość parametru Ra. Parametr Ra, zgodnie z przyjętą normą określony jest jako średnia wartość odchylenia od średniej grubości płytki na określonej drodze pomiaru. Definicję pomiaru Ra ilustruje Rys. 1. Zgodnie z Rys. 1 parametr Ra jest to średnia wartość odległości punktów $y_1, y_2, y_3, \dots, y_n, y_n$ profilu mierzonego od linii średniej na długości L odcinka mierniczego. Odchylenia od linii średniej sumują się bez względu na ich znak algebraiczny.



Rys 1. Ilustracja odchyień od średniej grubości na drodze L.

Fig. 1. Illustration of deviations from the mean thickness on the road L.

Dokładny wzór na wartość średniego arytmetycznego odchylenia Ra profilu ma postać:

$$Ra = \frac{1}{L} \int_A^B (y) dx \quad (1)$$

W przemyśle elektronicznym wprowadzono normę ASTM F – 1438, [5] która podaje definicję parametru Ra zgodnie z równaniem:

$$Ra = \left(\frac{1}{N} \right) \sum_{i=1}^N |Z_i - \bar{Z}| \quad (2)$$

gdzie: Z_i oznacza wysokość powyżej linii średniej w punktach (x,y) wypolerowanej powierzchni, i - liczbę punktów pomiarowych, N - liczbę punktów.

3. METODYKA BADAŃ

Mikrochropowatość powierzchni po polerowaniu zależy od rodzaju stosowanych tkanin i środków polerskich oraz przyjętej technologii. Do przeprowadzenia badań dysponowano czterema rodzajami tkanin polerskich oraz trzema rodzajami środków polerskich. Polerowanie płytek krzemowych jest operacją bardzo czułą na zmiany warunków prowadzenia procesu, dlatego też odpowiednie technologie należy opracowywać od razu na maszynach na których będzie wykonywać się w przyszłości płytki. Do polerowania płytek o niskiej mikrochropowatości powierzchni konieczne są minimum dwie maszyny polerskie o jednakowej konstrukcji, co umożliwi przenoszenie krążków z wypolerowanymi płytkami z jednej maszyny na drugą. Wynika to z wielostopniowego cyklu polerowania. W pierwszym stopniu polerowania z płytek usuwa się praktycznie całą ilość materiału wymaganą technologicznie – ~ 30 μm, w drugim stopniu (2 – 3) μm, a w trzecim tylko wy-

gładza się powierzchnie usuwając $\sim (1 - 3) \mu\text{m}$. Żeby uzyskać jednakową mikrochropowatość na całej powierzchni płytki pierwszy stopień polerowania musi zapewnić jak najmniejszą falistość – $\sim (3 - 5) \mu\text{m}$. Przy większej falistości powierzchni w obszarach gdzie płytka ma wgłębienia w czasie następnego cyklu polerowania będzie występować wyższa mikrochropowatość ponieważ przy usuwaniu krzemu o grubości $(1 - 3) \mu\text{m}$ „doliny” nie zostaną wystarczająco wygładzone. Przy pracy w cyklu trzystopniowym płytki muszą być polerowane na tym samym krążku. Gdyby po pierwszym stopniu płytki odklejono i ponownie naklejono na inny krążek występowało by takie samo zjawisko jak przy polerowaniu płytek o dużej falistości, stąd potrzebne są minimum dwie jednakowe polerki. Na pierwszej maszynie na której wykonuje się pierwszy i drugi stopień polerowania stosuje się tą samą tkaninę polerską. Maszyna ta jest wyposażona w podwójny układ stosowanych nacisków jednostkowych – kG/cm^2 powierzchni płytki oraz w podwójny układ dozowania mieszanek polerskich. Płytki po zakończeniu pierwszego cyklu są automatycznie płukane na tkaninie i następnie maszyna przelacza się na następny, inaczej zaprogramowany drugi cykl polerowania. Po zakończeniu cyklu krążki z płytkami przenosi się na drugą maszynę, gdzie wykonuje się ostatni cykl. Polerowanie to składa się z sekwencji trzech operacji polerskich różniących się czasem oraz naciskiem jednostkowym wywieranym na powierzchnię płytki, oraz z płukaniem wodą dejonizowaną pomiędzy operacjami. Zastosowano trzy sekwencje operacji technologicznych, których parametry przyjęto po przeprowadzeniu badań wstępnych.

Sekwencja 1. Nacisk jednostkowy $0,4 \text{ kG/cm}^2$ płytki, czas polerowania 40 sek.

Nacisk jednostkowy $0,9 \text{ kG/cm}^2$ płytki, czas polerowania 120 sek.

Nacisk jednostkowy $0,4 \text{ kG/cm}^2$ płytki, czas polerowania 45 sek.

Sekwencja 2. Nacisk jednostkowy $0,2 \text{ kG/cm}^2$ płytki, czas polerowania 20 sek.

Nacisk jednostkowy $0,7 \text{ kG/cm}^2$ płytki, czas polerowania 90 sek.

Nacisk jednostkowy $0,2 \text{ kG/cm}^2$ płytki, czas polerowania 30 sek.

Sekwencja 3. Nacisk jednostkowy $0,2 \text{ kG/cm}^2$ płytki, czas polerowania 15 sek.

Nacisk jednostkowy $0,5 \text{ kG/cm}^2$ płytki, czas polerowania 80 sek.

Nacisk jednostkowy $0,1 \text{ kG/cm}^2$ płytki, czas polerowania 30 sek.

Ilość podawanej mieszanki polerskiej była jednakowa w każdej sekwencji i wynosiła 100 ml/min .

Badania prowadzono stosując różne kombinacje zestawiania tkanin: Surfin 000, SPM 1300, poretex TK i środków polerskich Nalco LS oraz Nalco 8020 przy równoczesnych jednakowych zmianach w technologii polerowania (sekwencje). Podczas badań stosowano ten sam sposób mycia płytek po polerowaniu dla wszystkich prób, ponieważ sposób mycia ma duży wpływ na wielkość mikrochropowatości. Do mycia stosowano mieszankę SC-1 w płuczce megasonicznej. Podczas prac pomiary wielkości mikrochropowatości wykonywano na urządzeniu Scatteroscope. Do badań stosowano płytki o orientacji $\langle 100 \rangle$ oraz $\langle 111 \rangle$ o średnicy $3''$ przygotowane z tego samego monokryształu wyciąganego metodą Czochralskiego i razem obrabiane wstępnie.

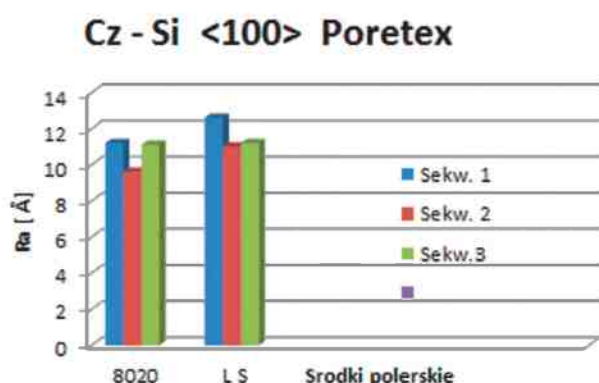
4. WYNIKI BADAŃ

Płytki polerowano w pierwszym i drugim stopniu na tkaninie Politex Regular. Do pierwszego stopnia polerowania zastosowano środek polerski produkcji krajowej o nazwie handlowej SIZOL - roztwór krzemionki koloidalnej w wodzie. Ten sposób polerowania gwarantuje uzyskanie odpowiedniej powierzchni płytek dla dalszych etapów pracy. Drugi stopień polerowania prowadzono na tej samej maszynie, ale stosując środek polerski Nalco 2354. Czas polerowania - 12 minut, nacisk - $1,2 \text{ kG/cm}^2$ płytki (pierwszy stopień polerowania prowadzi się przy nacisku $1,6 \text{ kG/cm}^2$ płytki). Parametrów pracy tych dwóch operacji (pierwszy i drugi stopień) nie zmieniano w czasie dalszych badań, uznano, że płytki są wystarczająco gładkie i o odpowiedniej geometrii (falistość) do końcowego polerowania. W trzecim stopniu polerowania na każdej z wytypowanych tkanin prowadzono próby z różnymi środkami polerskimi zgodnie z ustalonymi wcześniej sekwencjami parametrów polerowania.

Wyniki pomiarów wielkości mikrochropowatości są średnimi z pomiarów wykonanych na kilku płytkach. Na badanych płytkach pomiary były wykonywane w kilku punktach na powierzchni i uśredniane.

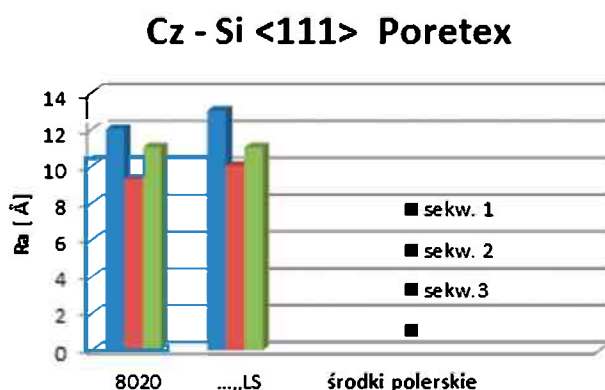
Badania rozpoczęto od tkaniny TK Poretex. Tkaniny te produkuje nowa firma na rynku i są one stosunkowo tanie. Sposób polerowania prowadzono zgodnie z założonymi sekwencjami, a jako środek polerski zastosowano krzemionkę koloidalną Nalco LS rozcieńczoną w wodzie dejonizowanej w stosun-

ku 1 : 20. Uzyskane wyniki były jednak dalekie od zamierzonych, wielkość mikrochropowatości zmierzona scatteroscopem wynosiła od 9 do 15 Å. Dla sprawdzenia poprawności pomiaru zmierzono płytki na urządzeniu Dektak. Wielkość mikrochropowatości była wyższa i wynosiła (15 – 18) Å. Zawyżone wartości wynikają ze specyfiki pomiarowej na tym urządzeniu. Wyniki są zawyżane o tzw. tło urządzenia, które wynosi ~ (4 - 5) Å. Następną próbę przeprowadzono stosując środek polerski Nalco 8020. Uzyskano minimalnie lepsze rezultaty, ale dalekie od założonych. Uznano, że nie jest to odpowiednia tkanina do polerowania końcowego dla płytek o wysokich wymaganiach (Rys. 2 - 3).



Rys. 2. Zilustrowanie wartości parametrów Ra dla powierzchni płytki krzemowej o orientacji <100> wypolerowanej na tkaninie Poretex środkami polerskimi Firmy Nalco o symbolach 8020 i LS.

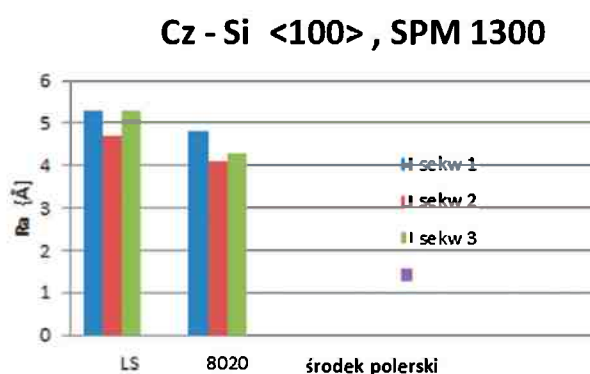
Fig. 2. Visualisation of Ra values for the surface of a <100> oriented Si wafer polished on the Poretex pad using the slurries with symbols Nalco 8020 and Nalco LS.



Rys. 3. Zilustrowanie wartości parametrów Ra dla powierzchni płytki krzemowej o orientacji <111> wypolerowanej na tkaninie Poretex środkami polerskimi Firmy Nalco o symbolach 8020 i LS.

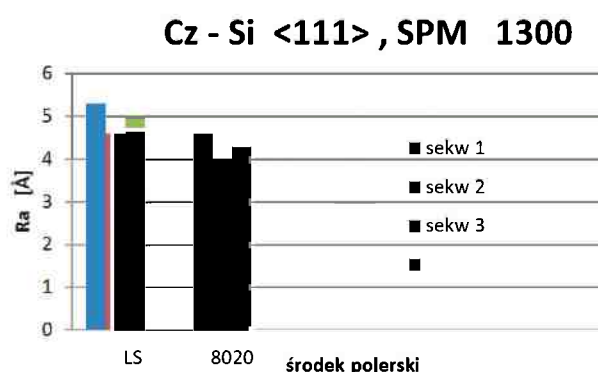
Fig. 3. Visualisation of Ra values for the surface of a <111> oriented Si wafer polished on the Poretex pad using the slurries with symbols Nalco 8020 and Nalco LS.

Następną tkaniną na której przeprowadzono polerowanie była SPM 1300. Pierwsze próby wykonano stosując jako środek polerski Nalco LS rozcieńczony wodą dejonizowaną 1:20. Wyniki polerowania uzyskane dla wszystkich trzech sekwencji były dobre, wartości Ra od 4 do 6 Å, jednak wyniki te nie spełniały założonego celu. Następną próbną z zastosowaniem w miejsce środka polerskiego LS - Nalco 8020 dały nieznacznie lepsze rezultaty (3 - 5) Å (Rys. 4 - 5). Ostatnią tkaniną zastosowaną do badań była tkanina nowej generacji Surfin 000. Przeprowadzono próby ze środkami polerskimi Nalco LS oraz Nalco 8020. Najlepsze wyniki uzyskano stosując krzemionkę Nalco 8020 rozcieńczoną wodą dejonizowaną 1:20



Rys. 4. Zilustrowanie wartości parametrów Ra dla powierzchni płytki krzemowej o orientacji <100> wypolerowanej na tkaninie SPM 1300 środkami polerskimi Firmy Nalco o symbolach 8020 i LS.

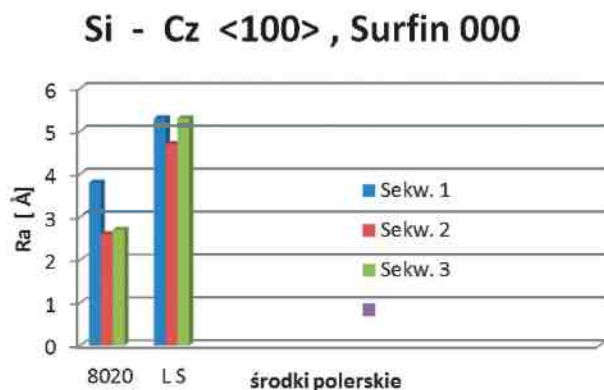
Fig. 4. Visualisation of Ra values for the surface of a <100> oriented Si wafer polished on the SPM 1300 pad using the slurries with symbols Nalco 8020 and Nalco LS.



Rys. 5. Zilustrowanie wartości parametrów Ra dla powierzchni płytki krzemowej o orientacji <111> wypolerowanej na tkaninie SPM 1300 środkami polerskimi Firmy Nalco o symbolach 8020 i LS.

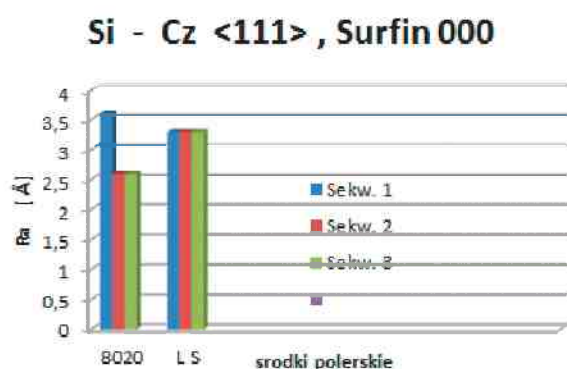
Fig. 5. Visualisation of Ra values for the surface of a <111> oriented Si wafer polished on the SPM 1300 pad using the slurries with symbols Nalco 8020 and Nalco LS.

dla sekwencji 2. Parametr Ra wynosił od 2 do 4 Å. W celu uzyskania jeszcze lepszych rezultatów następne badania prowadzono z zastosowaniem tkaniny Surfin 000 oraz środka polerskiego Nalco 8020 zmieniając nieznacznie wielkości parametrów



Rys. 6. Zilustrowanie wartości parametrów Ra dla powierzchni płytki krzemowej o orientacji <100> wypolerowanej na tkaninie Surfin 000 środkami polerskimi Firmy Nalco o symbolach 8020 i LS.

Fig. 6. Visualisation of Ra values for the surface of a <100> oriented Si wafer polished on the Surfin 000 pad using the slurries with symbols Nalco 8020 and Nalco LS.



Rys. 7. Zilustrowanie wartości parametrów Ra dla powierzchni płytki krzemowej o orientacji <111> wypolerowanej na tkaninie Surfin 000 środkami polerskimi Firmy Nalco o symbolach 8020 i LS.

Fig. 7. Visualisation of Ra values for the surface of a <111> oriented Si wafer polished on the Surfin 000 pad using the slurries with symbols Nalco 8020 and Nalco LS.

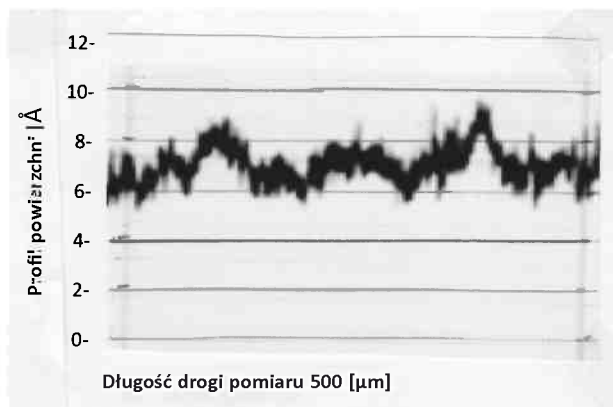
w sekwencji 2 (Rys. 6 - 7). Najlepsze wyniki uzyskano przy zastosowaniu następującej technologii:

1. Czas 25 s, nacisk na płytkę 0,2 kG/cm², środek polerski – Nalco 8020.
2. Czas 96 s, nacisk na płytkę 0,8 kG/cm², środek polerski – Nalco 8020.
3. Czas 93 s, nacisk na płytkę 0,8 kG/cm², woda dejonizowana.

4. Czas 35 s, nacisk na płytkę 0,1 kG/cm², środek polerski - Nalco 8020.

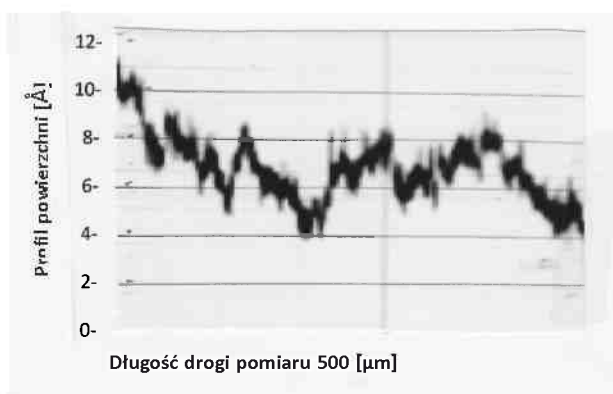
5. Czas 45 s, nacisk na płytkę 0,1 kG/cm², woda dejonizowana.

Polerując na tkaninie Surfin 000 środkiem polerskim Nalco 8020 rozcieńczonym wodą dejonizowaną 1:20 i stosując powyższą technologię uzyskano gładkość powierzchni polerowanych płytek w granicach 2 – 3 Å. (Rys. 8 - 9).



Rys. 8. Przykładowy rysunek profilu powierzchni wypolerowanej płytki krzemowej zmierzony za pomocą urządzenia Dektak na drodze o długości 500 µm. Mikrochropowatość badanej powierzchni zawiera się w granicach (2 - 4) Å. Widoczna jest również mikrofalistość powierzchni płytki wynosząca ~ 5 Å.

Fig. 8. Exemplary graph presenting the surface profile of the polished silicon wafer measured using a Dektak instrument at a distance of 500 µm. Micro-roughness of the examined surface ranges between 2 and 4 Å. Microflatness of the surface of this wafer is around 5 Å.



Rys. 9. Przykładowy rysunek profilu powierzchni wypolerowanej płytki krzemowej zmierzony za pomocą urządzenia Dektak na drodze o długości 500 µm. Mikrochropowatość badanej powierzchni zawiera się w granicach (2 - 4) Å. Widoczna jest również mikrofalistość powierzchni płytki wynosząca ~ 8 Å.

Fig. 9. Exemplary graph presenting the surface profile of the polished silicon wafer, measured using a Dektak instrument at a distance of 500 µm. Micro-roughness of the examined surface ranges between 2 and 4 Å. Microflatness of the surface of this wafer is around 8 Å.

Dla zbadania jakie są różnice w gładkości powierzchni dla płytek o orientacji $\langle 111 \rangle$ oraz $\langle 100 \rangle$ równolegle prowadzono wszystkie badania dla płytek o tych orientacjach. Stwierdzono, że lepszą gładkość powierzchni uzyskuje się dla płytek o orientacji $\langle 111 \rangle$. Zgodnie ze strukturą krystaliczną Si większe upakowanie atomowe występuje w kierunku $\langle 111 \rangle$ niż w kierunku $\langle 100 \rangle$. Z tego samego powodu płytki o orientacji $\langle 111 \rangle$ wolniej się polerują.

5. PODSUMOWANIE

Celem przeprowadzonych badań było uzyskanie powierzchni polerowanej płytek krzemowych o gładkości w granicach $(2 - 3) \text{ \AA}$. Użytkownicy polerowanych płytek wymagają coraz to lepszej powierzchni pod względem czystości, jak również coraz to mniejszej mikrochropowatości. Do prowadzenia badań dysponowaliśmy odpowiednim parkiem maszynowym – polerki, jak również nowymi rodzajami tkanin i środków polerskich. Przeprowadzono badania stosując przyjęte sekwencje polerowania dla trzech rodzajów tkanin oraz dwóch środków polerskich. W wyniku badań założony cel został osiągnięty. Najlepsze rezultaty uzyskano stosując tkaninę Surfin 000 oraz środek polerski Rodel 8020.

Autorzy dziękują pracownikom Zakładów Z-2, Z-6 i Z-7 za wykonywanie pomiarów Ra.

LITERATURA

- [1] Toquetti L. Z., Nogueira W. A. Influence of the cleaning procedure on the surface roughness of silicon wafers, *Bulletin of University of Sao Paulo*, 1990
- [2] Teichert, Mackay J.F., Savage D.E.: Comparison of surface roughness of polished silicon wafers measured by light scattering topografy, soft – x Ray scattering, and atomic-force microscopy, *Bulletin of University of Wisconsin – Madison* 1995. Brohl M., Wagner P. *Bulletin Wacker-chemitronic* 1995
- [3] Shive L. W., and Gilmore B. L.: Impact of thermal processing on silicon wafer surface roughness. MEMC Electronic materials Inc, St peters MO USA. *Journal of Electronic Society ECS Trans.*, 16, (8), (2008), 401
- [4] White Michael, Romine R., Jones L., Ackerman W.: The mechanism of haze and defectivity reduction in a new generation of high performance silicon final polishing slurries, *Bulletin of Cabot Microelectronics CorpAurora II USA*, 1997
- [5] Annual book of ASTM Standards 2001 Volume 10.05 Electronic.