

# GENERACJA DYSLOKACYJNYCH LINII POŚLIZGU W PŁYTKACH KRZEMOWYCH PODCZAS PROCESU EPITAKSJI

- <sup>1)</sup> Elżbieta Nossarzewska-Orłowska, Halina Wodzińska, Jerzy Skwarcz  
<sup>2)</sup> Andrzej Tkaczuk, Teresa Zielińska, Helena Nowotnik

Dyslokacyjne linie poślizgu są wprowadzane do płytki krzemowej podczas wysokotemperaturowego procesu epitaksji na skutek naprężeń termicznych powstałych w wyniku radialnego gradientu temperatury. Badano wpływ wygięcia płytek podłożowych na generację linii poślizgu na grzejniku z "kieszeniami" w reaktorze do epitaksji GEMINI.

## 1. WSTĘP

Dyslokacyjne linie poślizgu powstają w płytkach krzemowych podczas procesów prowadzonych w wysokiej temperaturze na skutek naprężeń mechanicznych i termicznych. Jednym z takich procesów jest epitaksja z fazy gazowej, prowadzona w temperaturze 1100 - 1200 °C (1370 - 1470 K). Ponieważ linie poślizgu mogą spowodować degradację parametrów wytwarzanych przyrządów w warstwie epitaksjalnej, powszechnie przyjęte normy, takie jak SEMI Standards, ograniczają dopuszczalną ilość i długość linii poślizgu. Odpad, spowodowany obecnością tych defektów znacznie podwyższa koszt wytwarzania płytki epitaksjalnej, stąd poznanie przyczyn i mechanizmów powstawania dyslokacyjnych linii poślizgu jest ważnym zagadnieniem badawczym przy opracowywaniu właściwych technologii.

## 2. PRZYCZYNY POWSTAWANIA DYSLOKACYJNYCH LINII POŚLIZGU W REAKTORZE DO EPITAKSJI

W reaktorze do epitaksji płytka krzemowa leży na gorącym grzejniku grafitowym i od niego pobiera ciepło, natomiast druga jej powierzchnia (czynna) odpromieniowuje ciepło. Strata cieplna ( $Q_1$ ) jest bilansowana przez strumień cieplny ( $Q_2$ ),

<sup>1)</sup> Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych  
ul. Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa

<sup>2)</sup> CEMAT Silicon, ul. Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa

spowodowany powstałym gradientem temperatury. W ustalonych warunkach oba strumienie są równe:

$$Q_1 = ekT^4; \quad Q_2 = K dT/dz; \quad Q_1 = Q_2 \quad (1)$$

gdzie:

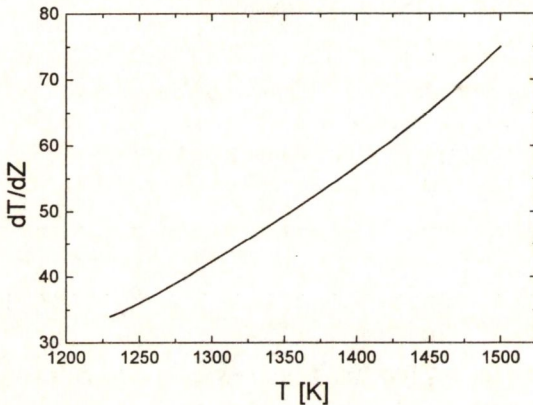
e - współczynnik emisyjności Si (0.6);

k - stała Boltzmana ( $1.355 \times 10^{-12}$  cal/deg s  $cm^2$ );

T - temperatura ;

K - przewodnictwo cieplne Si (0.055 cal/deg s cm - dla zakresu 1000 -1500K);

z - grubość płytki.



**Rys. 1.** Zależność gradientu osiowego temperatury w płytce krzemowej od temperatury grzejnika.

Z równości (1) wynika, że w płytce, która przylega całą powierzchnią do grzejnika utrzymuje się stały gradient osiowy temperatury, zależny od temperatury grzejnika (rys. 1). Przykładowo, dla  $T=1423$  K, w której zwykle prowadzi się proces epitaksji z  $SiCl_4$  wynosi on około  $60$  °C/cm. Prostopadły do powierzchni płytki (osiowy) gradient temperatury nie generuje linii poślizgu, ale różnica temperatury na przeciwnych powierzchniach płytki powoduje jej wygięcie (dolna powierzchnia, o wyższej temperaturze bardziej się rozszerza). Promień wygięcia ( $R_{wyg.}$ ) jest dany przez:

$$1/R_{wyg.} = \alpha (dT/dz) , \quad (2)$$

gdzie:

$\alpha$  - współczynnik rozszerzalności cieplnej Si ( $4 \times 10^{-6}$  deg $^{-1}$ ).

W temperaturze  $1423$  K promień ten wynosi  $\sim 40$  m, czyli wygięcie dla płytki o średnicy 4 cale wynosi  $\sim 30$   $\mu m$ . Na skutek wygięcia brzeg płytki traci kontakt z grzejnikiem, staje się zatem chłodniejszy, gdyż przenoszenie ciepła z grzejnika następuje teraz poprzez przewodnictwo cieplne w wodorze (gaz nośny). Powoduje to wystąpienie radialnego gradientu temperatury. Ten gradient jest odpowiedzialny za powstanie naprężeń ścinających, które prowadzą do generacji poślizgów.

Aby oszacować jaka różnica temperatury pomiędzy brzegiem, a środkiem płytki o średnicy 4 cali może wywołać poślizgi, wykorzystano dane z literatury [1]. Dla



parabolicznego rozkładu temperatury w płytce, radialne naprężenia ( $\sigma_r$ ) i styczne naprężenia ( $\sigma_\tau$ ) wynoszą w odległości  $r$  od środka płytki, odpowiednio:

$$\sigma_r = \sigma_0 (r^2/R^2 - 1); \quad \sigma_\tau = \sigma_0 (3r^2/R^2 - 1); \quad (3)$$

gdzie:  $R$  - promień całkowity płytki,

$$\sigma_0 = \alpha E \Delta T,$$

gdzie:  $E$  - moduł Younga ( $\sim 2 \times 10^{12}$  dyn/cm<sup>2</sup> dla Si <111> i  $\sim 1.3 \times 10^{12}$  dyn/cm<sup>2</sup> dla Si <100>),

$\Delta T$  - różnica temperatury pomiędzy brzegiem a środkiem płytki.

stąd:  $\sigma_0 \approx 8 \times 10^6 \Delta T$  dyn/cm<sup>2</sup> dla orientacji <111>,

$\sigma_0 \approx 5 \times 10^6 \Delta T$  dyn/cm<sup>2</sup> dla orientacji <100>.

Maksymalne naprężenie ścinające występuje na brzegu płytki, dla  $r = R$ , i wynosi:

$$\tau_{\max} = (1/2)(\sigma_r - \sigma_\tau) = -\sigma_0 \quad (4)$$

Jeśli naprężenie ścinające przekroczy wartość krytyczną ( $\tau_{kr}$ ), która odpowiada połowie wartości granicy plastyczności, określanej w teście na rozrywanie, to następuje generacja dyslokacji w postaci poślizgu.

Dla Si  $\tau_{kr}$  zależy od temperatury i w 1423 K jest  $\sim 10^8$  dyn/cm<sup>2</sup>;

Warunek:

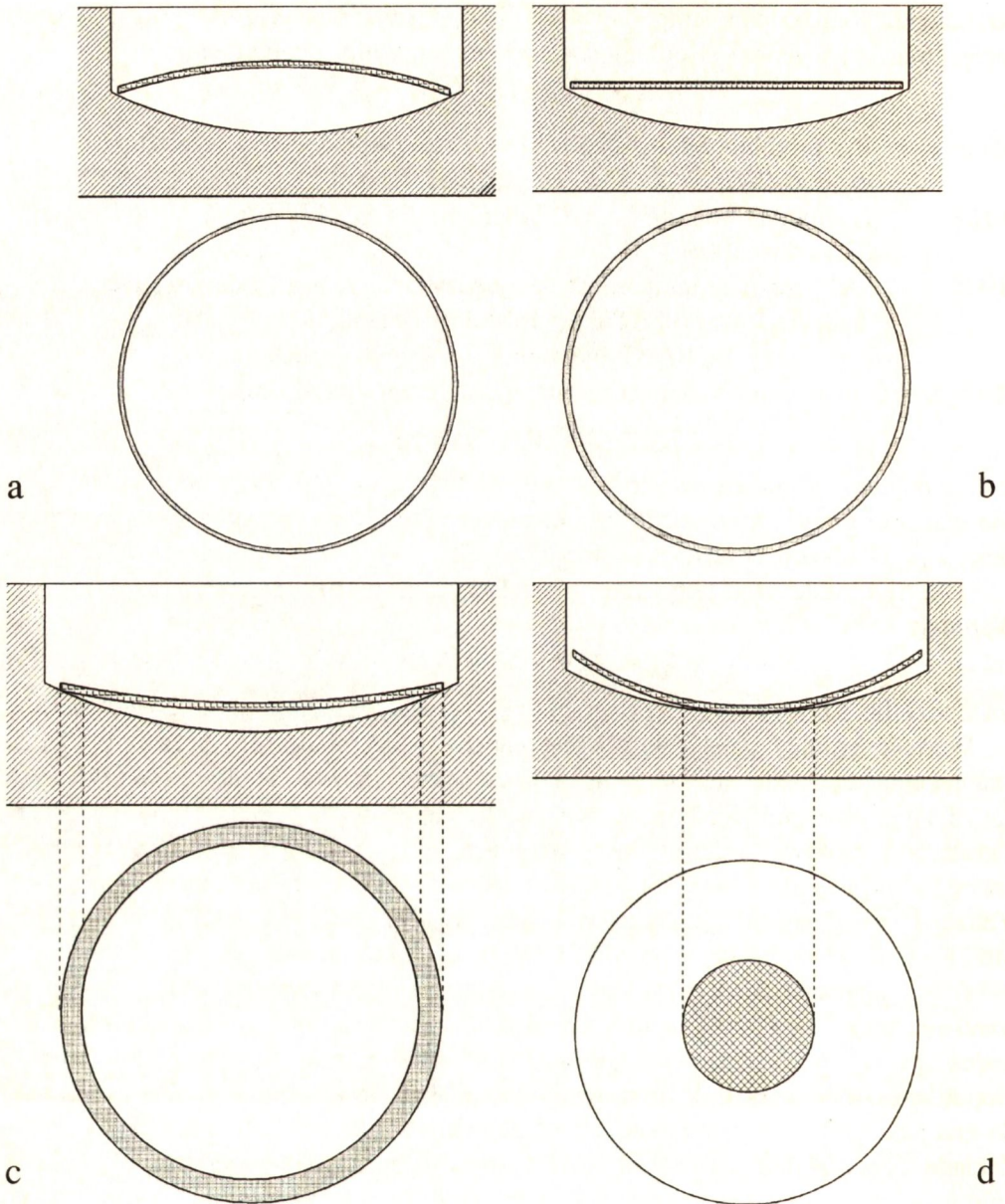
$$\tau_{\max} > \tau_{kr} > 10^8 \text{ dyn/cm}^2, \quad (5)$$

zachodzi dla  $\Delta T > 12.5^\circ\text{C}$  dla orientacji <111> i dla  $\Delta T > 20^\circ\text{C}$  dla orientacji <100>.

Wartość granicy plastyczności jest bardzo czuła na defekty krystalograficzne i naprężenia mechaniczne, które mogą ją znacznie obniżyć. W płytkach z warstwą epitaksjalną prawdopodobieństwo wprowadzenia naprężeń mechanicznych wzrasta z grubością warstwy, jeśli płytka "przyrasta" do grzejnika. Aby temu zapobiec, krawędź płytki podłożowej jest zeszlifowana pod odpowiednim kątem. W płytkach o dużej koncentracji domieszki łatwość powstawania poślizgów wzrasta w szeregu: Si(As)  $\rightarrow$  Si(B)  $\rightarrow$  Si(Sb) z powodu wzrostu naprężeń wewnętrznych.

Aby zmniejszyć osiowy gradient temperatury i uniknąć wygięcia płytki zaprojektowano reaktory do epitaksji, w których płytki grzane są z obu stron za pomocą lamp podczerwieni. Rozwiązanie takie komplikuje jednak konstrukcję reaktora i jest bardziej kłopotliwe w eksploatacji. W urządzeniu do epitaksji firmy Gemini (USA) zastosowano grzejniki grafitowe z wgłębieniami ("kieszeniami"), w których układane są płytki. Zakłada się, że płytka wygięta na skutek osiowego gradientu temperatury osiadzie na dnie wgłębienia, co zapewni przyleganie do grzejnika całą powierzchnią i zapobiegnie powstaniu radialnego gradientu temperatury. W praktyce, nie wszystkie płytki przylegają całą powierzchnią do grzejnika. Na rys.2 pokazano najczęściej występujące przyładki położenia płytki w kieszeni i zaznaczono obszar styku płytki z grzejnikiem.

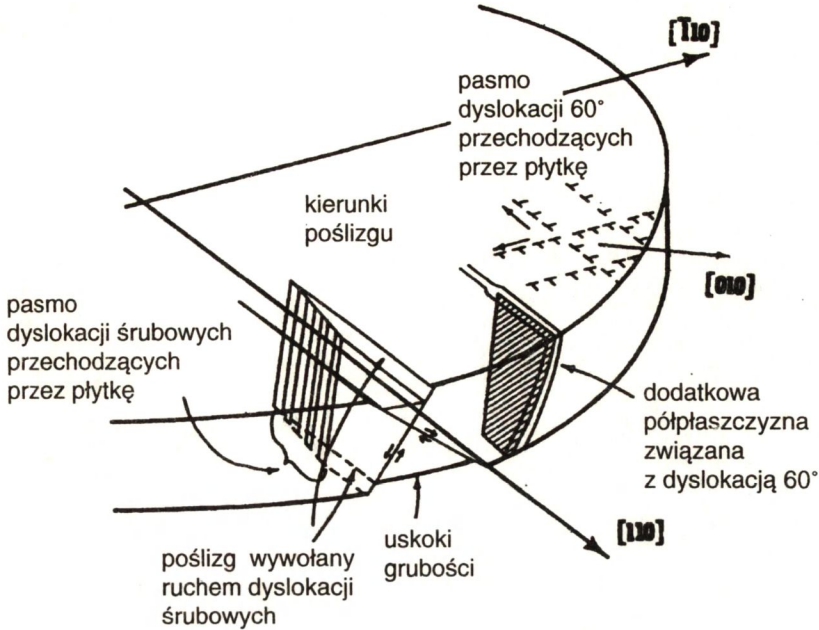
Analiza krystalograficzna generacji i propagacji dyslokacji w płytce krzemowej, w której występują naprężenia termiczne zawarta jest w pracach [1-7]. Jako przykład, powstanie poślizgów w płytce o orientacji <100> zilustrowane jest na rys. 3. Linie poślizgu obserwuje się głównie w pobliżu brzegu płytki (rys.4), gdyż w tym obszarze



Rys. 2. Najczęściej występujące przypadki ułożenia płytki podłożowej w "kieszni" grzejnika.

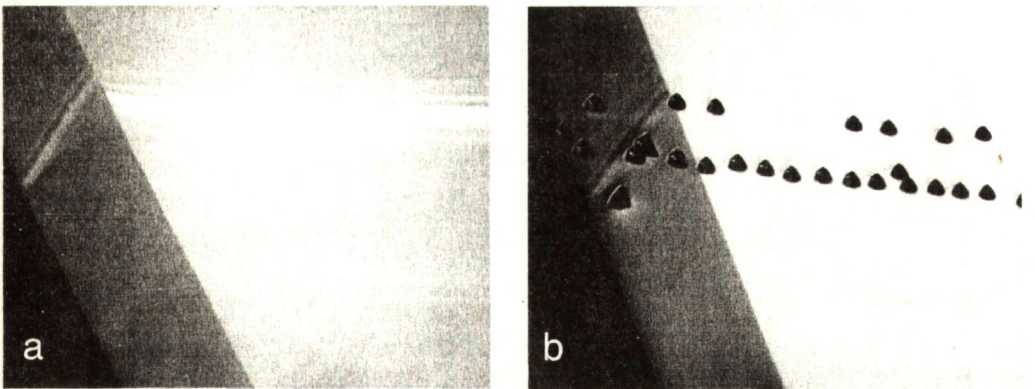
jest zwykle największy gradient radialny temperatury, niezależnie od znaku  $\Delta T$  (środek płytki bardziej lub mniej gorący od brzegu). Rzadziej, sieć linii poślizgu obserwuje się w środku płytki. Ten przypadek może wystąpić w płytkach o dużym wygięciu, które



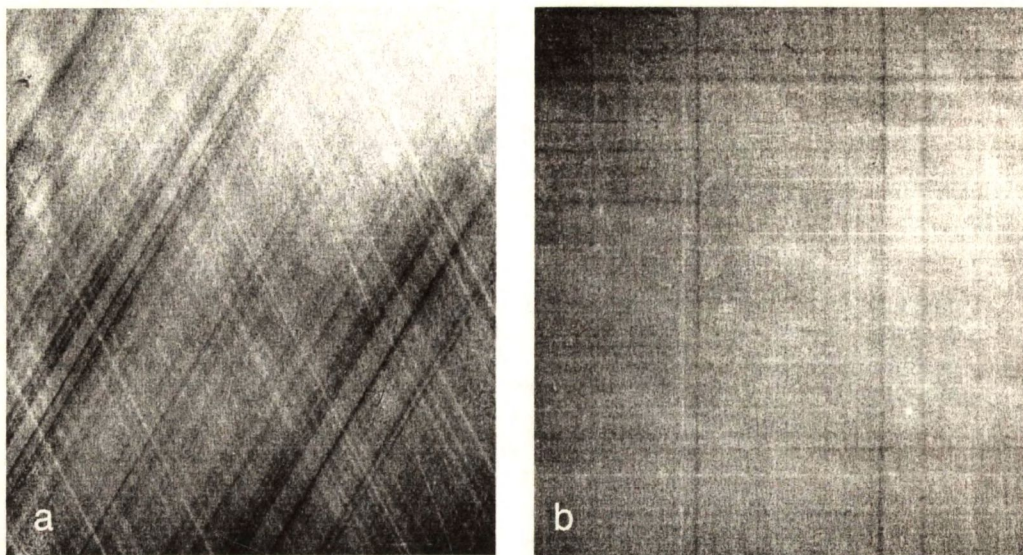


**Rys. 3.** Styczne naprężenie termiczne (rozciągające) na brzegu płytki może być uwolnione przez (a) poślizg i uskoki na grubości wywołany ruchem do wewnątrz dyslokacji śrubowej (głównie w kierunku  $\langle 110 \rangle$ ); (b) wprowadzenie dodatkowej półpłaszczyzny przez dyslokacje  $60^\circ$  (głównie w kierunku  $\langle 100 \rangle$ ) [6].

przylegają do grzejnika tylko częścią środkową (jak na rys.2d). Jeżeli "gorący" środek jest uwięziony w "zimnym" pierścieniu, to występują w nim silne naprężenia ściskające. W przypadku, gdy duży gradient temperatury jest rozłożony w płytce równomiernie, obserwuje się sieć poślizgów na całej powierzchni (rys.5).



**Rys. 4.** Brzeg płytki z liniami poślizgu na powierzchni warstwy epitaksjalnej:  
 a) obraz pod mikroskopem z kontrastem Nomarsky'ego,  
 b) ten sam fragment po ujawnieniu dyslokacji w roztworze Sirtla.  
 Powiększenie 100x.



Rys. 5. Sieć linii poślizgu na całej powierzchni warstwy epitaksjalnej. Obraz pod mikroskopem z kontrastem Nomarsky'ego.

a) płytka o orientacji  $\langle 111 \rangle$ ;

b) płytka o orientacji  $\langle 100 \rangle$ .

Powiększenie 100x.

### 3. WPŁYW GEOMETRII PŁYTEK PODŁOŻOWYCH NA GENERACJĘ LINII POŚLIZGU PODCZAS PROCESU EPITAKSJI

Parametry geometryczne, których pomiar służy do kontroli geometrii płytek, to:

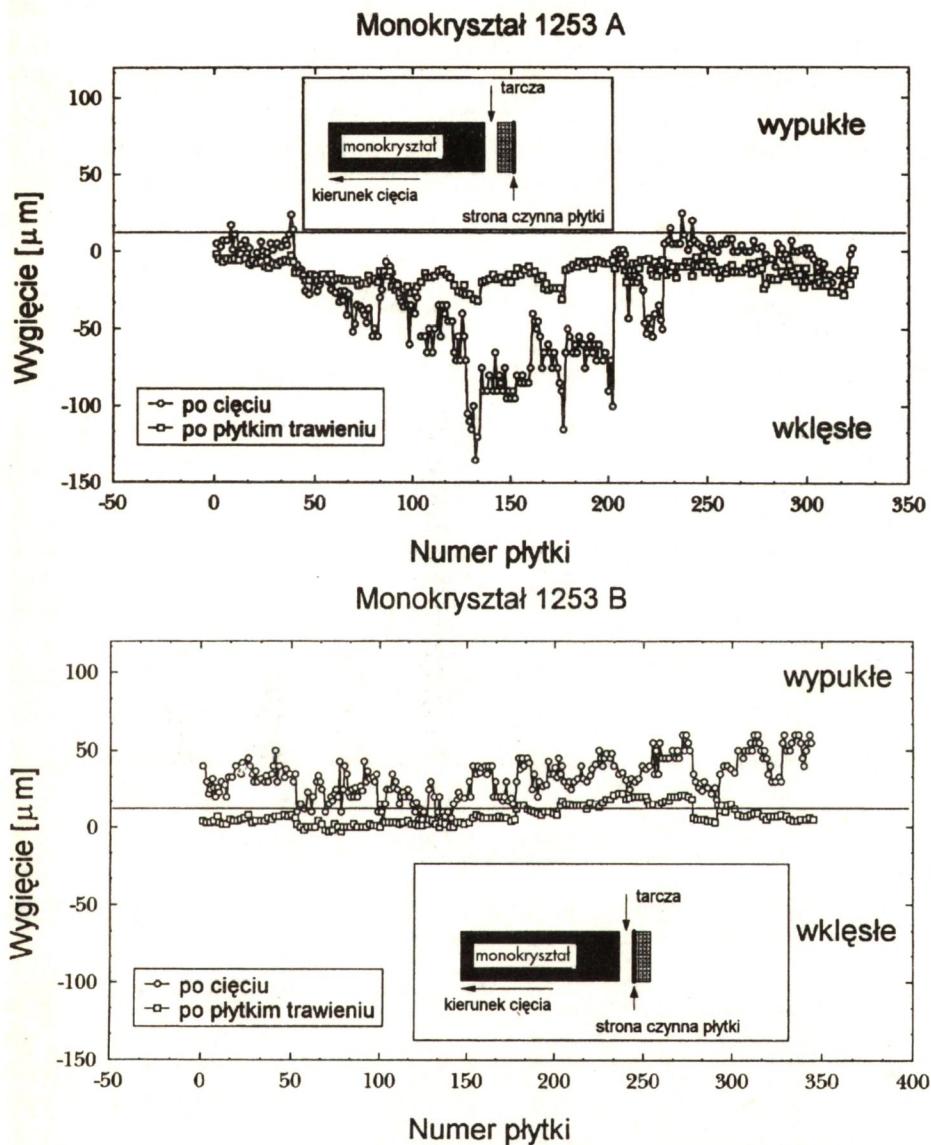
- strzałka wygięcia, czyli odchylenie środkowej płaszczyzny wolno leżącej płytki od płaszczyzny wyznaczonej przez 3 punkty podparcia na jej obrzeżu, zmierzony w środku płytki. Określa się wielkość ( $\mu\text{m}$ ) i znak wygięcia ("+" lub "-"). W niniejszej pracy przyjęto, że znak "-" oznacza wklęsłość od strony czynnej, na której osadzana jest warstwa epitaksjalna;
- zwichrowanie, czyli różnica pomiędzy maksymalną i minimalną odległością środkowej płaszczyzny płytki od płaszczyzny odniesienia. Określa się wielkość zwichrowania ( $\mu\text{m}$ ).

Pomiar tych parametrów nie pozwala na wyznaczenie kształtu płytki, umożliwia tylko ocenę odchylenia od płytki idealnie płaskiej. Niemożliwe jest zatem powiązanie powstałej sieci dyslokacji z kształtem indywidualnej płytki. W związku z tym przeprowadzono analizę statystyczną dla dużej partii płytek podłożowych (~1000 sztuk), w których kontrolowano znak strzałki wygięcia (wklęsłość lub wypukłość) i jej wielkość.

Podstawową przyczyną wyginania płytek krzemowych jest obecność przypowierzchniowej warstwy uszkodzonej. Droga od monokryształu do płytki polerowanej



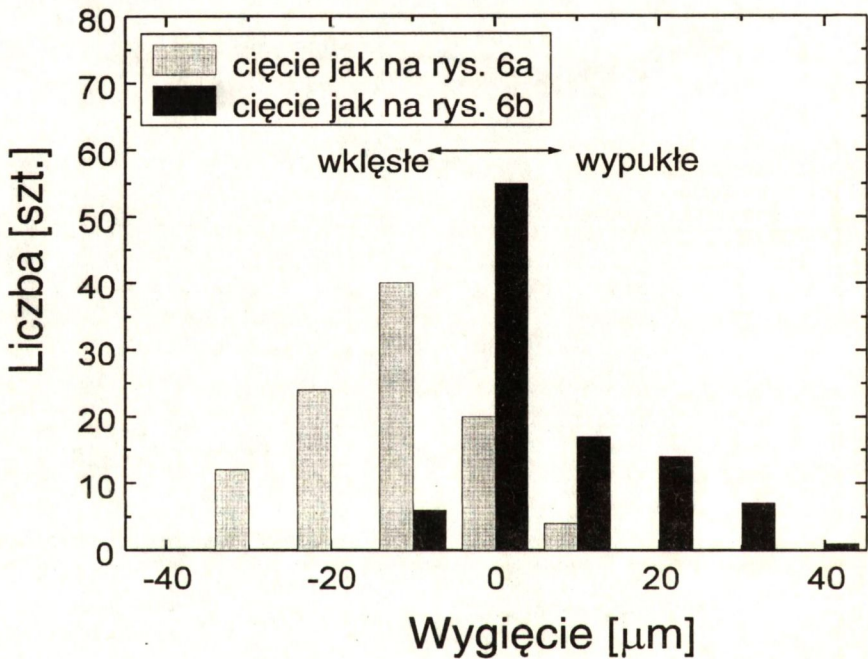
prowadzi przez szereg operacji obróbki mechanicznej i chemicznej: cięcie monokryształu, szlifowanie, trawienie chemiczne i polerowanie. Najgłębsza warstwa uszkodzona powstaje w operacji cięcia monokryształu. Dwustronne szlifowanie, a następnie trawienie chemiczne mają na celu usunięcie tej warstwy.



**Rys. 6.a,b)** Strzałka wygięcia płytek po operacji cięcia i po usunięciu przypowierzchniowej warstwy uszkodzonej. Punkty odpowiadają wartości strzałki wygięcia kolejnych płytek z jednego monokryształu. (Linię łączącą poprowadzono dla ułatwienia odczytu wykresu).

We wstawkach pokazano pozycję tarczy tnącej w stosunku do czynnej strony płytki, na której osadzana jest warstwa epitaksjalna.

Na rys.6 pokazany jest przykładowy rozkład strzałki wygięcia płytek wzdłuż ciętego monokryształu dla dwóch konfiguracji tarczy tnącej w stosunku do płaszczyzny czynnej, na której osadzana jest warstwa epitaksjalna. Podczas cięcia płytki położenie tarczy tnącej kontrolowane jest przez czujnik bezkontaktowy. W technologii zakłada się dopuszczalne odchylenie tarczy od kierunku cięcia jest w granicach +5 do -15 mm. Jeśli nastąpi większe przegięcie, to krawędź tarczy z nasypem diamentowym jest ostrzona. Po cięciu, płytki są trawione aż do usunięcia przypowierzchniowej, najbardziej zdefektowanej warstwy uszkodzonej przez tarczę tnącą. W rezultacie tego trawienia strzałka wygięcia ulega znacznemu zmniejszeniu, a w niektórych partiach płytek zmienia się nawet jej znak.



Rys. 7. Rozkład statystyczny strzałki wygięcia płytek podłożowych dla dwóch konfiguracji pozycji tarczy tnącej w stosunku do czynnej strony płytki.

Następne operacje: szlifowanie i trawienie chemiczne, polegają na dwustronnej obróbce, co oznacza, że pozostała warstwa uszkodzona jest w przybliżeniu taka sama po obu stronach płytki. Rys.7 przedstawia statystyczny rozkład strzałki wygięcia płytek podłożowych po operacji szlifowania i trawienia dla dwóch konfiguracji mocowania monokryształu na pile, pokazanych na rys.6.

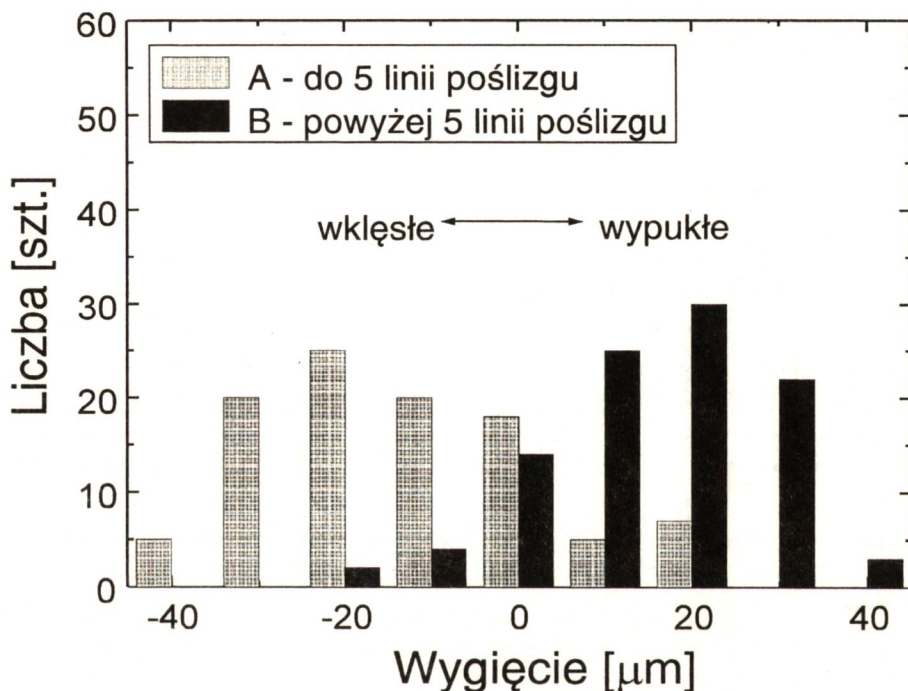
Z diagramów na rys. 6 i 7 wynika, że przy pozycji monokryształu jak na rys.6a, otrzymuje się ponad 90% płytek wklęsłych od strony czynnej (znak "-"). Dla pozycji jak na rys.6b, uzyskuje się większy udział płytek "płaskich" (od -5+5 μm), ale około 40% stanowią płytki wypukłe od strony czynnej (znak "+").

Operacja polerowania nie zmienia w sposób znaczący wygięcia płytek.



Następnie, pomiar strzałki wygięcia powtórzono dla dwóch grup płytek z warstwą epitaksjalną: A) bez linii poślizgu i do 5 linii włącznie (dopuszczalna przez normę SEMI); B) z 6 lub więcej liniami. Analizę przeprowadzono dla płytek podłożowych o średnicy 4 cale, domieszkowanych Sb, o orientacji  $\langle 111 \rangle$  i grubości 400  $\mu\text{m}$ . Warstwa epitaksjalna miała grubość  $50 \pm 60 \mu\text{m}$ . Procesy epitaksji prowadzone były w urządzeniu GEMINI 1. Kieszenie w grzejniku miały kształt cylindra o wysokości  $\sim 700 \mu\text{m}$ , a wklęsłość w środku cylindra wynosiła  $\sim 60 \mu\text{m}$ .

Statystyczny rozkład strzałki wygięcia płytek z warstwą epitaksjalną przedsta-



**Rys. 8.** Rozkład statystyczny strzałki wygięcia płytek z warstwą epitaksjalną. A - grupa płytek o dopuszczalnej ilości linii poślizgu. B - grupa płytek z dużą ilością linii poślizgu.

wiony jest na rys.8. Diagram pokazuje, że wśród płytek z dużą ilością linii poślizgu dominują płytki z wypukłą stroną czynną. Widoczna jest tendencja do zwiększenia strzałki wygięcia w trakcie procesu epitaksji, z zachowaniem znaku. Należy zauważyć, że pomiar strzałki wygięcia prowadzony jest po wyjęciu płytek z reaktora, w temperaturze pokojowej. Wartość strzałki wygięcia płytek na grzejniku w wysokiej temperaturze może być większa.

Stosując kryterium dopuszczalnych 5 linii poślizgu, z płytek ciętych jak na rys.6a, otrzymano 92% płytek dobrych, w tym 40% płytek bez linii poślizgu. W przypadku płytek ciętych jak na rys.6b) uzysk wyniósł 60%, w tym 18% płytek

bez linii poślizgu.

Dodatkowo, wyselekcjonowano partię płytek podłożowych o dużej wartości strzałki wygięcia ( $40 \div 60 \mu\text{m}$ ), z zachowaniem wklęsłości od strony czynnej. Do procesów epitaksji użyto dwa grzejniki firmy Toshiba, różniące się profilem dna kieszeni: Nr 1, o zagłębieniu w dnie  $\sim 90 \mu\text{m}$  i Nr 2, o zagłębieniu  $\sim 60 \mu\text{m}$ . W przypadku tych płytek zastosowanie grzejnika nr 1 dało większy uzysk - 90% w stosunku do 70% dla grzejnika nr 2. Świadczy to o wpływie profilu "kieszeni" na generację linii poślizgu.

#### 4. PODSUMOWANIE

Przyczyną generacji dyslokacyjnych linii poślizgu w płytkach krzemowych podczas procesu epitaksji są naprężenia termiczne spowodowane radialnym gradientem temperatury. W temperaturze 1423 K generacja następuje przy różnicy temperatury ( $\Delta T$ ) pomiędzy środkiem, a brzegiem płytki o średnicy 4 cali dla  $\Delta T > 12.5^\circ$  dla orientacji  $\langle 111 \rangle$  i dla  $\Delta T > 20^\circ$  dla orientacji  $\langle 100 \rangle$ .

Przeprowadzona analiza wykazała, że prawdopodobieństwo generacji linii poślizgu podczas procesu epitaksji w urządzeniach GEMINI na grzejniku z kieszeniami wzrasta, jeżeli płytki podłożowe mają wypukłą czynną powierzchnię i obszar styku płytki z grzejnikiem ograniczony jest do pierścienia przy krawędzi płytki.

W przypadku płytek o wklęsłej powierzchni czynnej wskazany jest dobór grzejnika o odpowiednim zagłębieniu kieszeni, w zależności od wielkości strzałki wygięcia płytek podłożowych.

Dla płytek płaskich zagłębienie "kieszeni" powinno wynosić  $20 \div 40 \mu\text{m}$ , gdyż takie wygięcie wynika z osiowego gradientu temperatury na płycie.

Kontrola strzałki wygięcia płytek podłożowych domieszkowanych Sb pozwoliła podwyższyć uzysk płytek z warstwą epitaksjalną, wytwarzaną w urządzeniu Gemini 1 z  $\sim 50\%$  do  $\sim 90\%$ .

Praca wykonana w ramach projektu celowego nr 8 8037 93 C/1508 finansowanego przez Komitet Badań Naukowych

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Bloem J., Goemans A. H.: Slip in silicon epitaxy. J. Appl. Phys. 1972, 43, 1281-1283
- [2] Morizane K., Gleim P. S.: Thermal stress and plastic deformation of thin silicon slices. J. Appl. Phys. 1969, 40, 4104-4107
- [3] Rai-Choudhury P., Takei W. J.: Thermally induced dislocations in silicon. J. Appl. Phys., 1969, 40, 4980-4982
- [4] Huff H. R., Bracken R. C., Rea S. N.: Influence of silicon slice curvature on thermally induced stresses. J. Electrochem. Soc, 1971, 118, 143-145



- [5] Dyer L. D., Huff H. R., Boyd W. W.: Plastic deformation in central regions of epitaxial silicon slices. *J. Appl. Phys.*, 1971, 42, 5680-5688
- [6] Hu S. M., Klepner S. P., Schwenker R. O., Seto D. K.: Dislocation propagation and emitter edge defects in silicon wafers. *J. Appl. Phys.*, 1976, 47, 4098-4106
- [7] Leroy B., Plougonven C.: Warpage of silicon wafers. *J. Electrochem. Soc.*, 1980, 127, 961-970

## SUMMARY

### GENERATION OF DISLOCATION SLIPS IN Si WAFERS DURING EPITAXIAL PROCESS

Dislocation slips are introduced into silicon slices during high-temperature epitaxial process due to the thermal stresses caused by the radial thermal gradient. The influence of the substrates curvature on slip generation has been investigated for a susceptor with "pockets" in GEMINI epitaxial reactor.

## СОДЕРЖАНИЕ

### ГЕНЕРАЦИЯ ДИСЛОКАЦИОННЫХ ЛИНИЙ СКОЛЬЖЕНИЯ В ПЛАСТИНАХ Si ВО ВРЕМЯ ЭПИТАКСИИ

Дислокационные линии скольжения возникают в кремниевых пластинах во время высокотемпературного процесса эпитаксии из-за термических напряжений в следствии радиального градиента температуры. Проводилось исследование влияния изгиба подложек на генерацию линий скольжения для нагревателя с "карманами" в эпитаксиальном реакторе GEMINI.