

Krzemowe warstwy epitaksjalne o grubości powyżej 20 μm

Defekty strukturalne i niejednorodność chemiczna monokryształu krzemu ograniczają możliwości poprawy charakterystyk elektrycznych przyrządów mocy o dużej powierzchni złącza p-n. Ponieważ wzrost epitaksjalny umożliwia otrzymanie krzemu monokrystalicznego o lepszych własnościach strukturalnych i bardziej jednorodnym rozkładzie domieszki niż w krzemie wyciąganym z fazy ciekłej, w przemyśle elektronicznym coraz bardziej widać tendencję oparcia produkcji półprzewodnikowych przyrządów mocy na technice epitaksji. Z punktu widzenia formowania złącza w tych przyrządach można wyróżnić trzy metody:

- 1/ płytką dyfuzją domieszki do warstwy epitaksjalnej przeciwnego typu przewodnictwa,
- 2/ otrzymanie złącza p-n na granicy podłoża-warstwa epitaksjalna,
- 3/ otrzymanie złącza epitaksjalnego przez wzrost warstwy epitaksjalnej na warstwie przeciwnego typu.

We wszystkich przypadkach jest konieczne wykonanie warstwy epitaksjalnej o grubości wykraczającej poza typowy zakres 5-20 μm . W Zakładzie Epitaksji ONPMP wykonano proces nad otrzymaniem krzemowych warstw epitaksjalnych o grubości do 100 μm . Warstwy otrzymano z reakcji redukcji SiCl_4 wodorem w temperaturze 1160-1170°C. Stosowano szybkości wzrostu rzędu ok. 1 $\mu\text{m}/\text{min}$. Płytki podłożowe były cięte w płaszczyźnie (111) z dezorientacją $2^\circ+30'$ z krzemu monokrystalicznego domieszkowanego Sb, o rezystywności ok. 0,01 $\Omega \cdot \text{cm}$. Bezpośrednio przed zapoczątkowaniem wzrostu, płytki trawiono gazowym HCl w temperaturze 1220°C. Procesy prowadzono w urządzeniu do epitaksji z poziomą komorą reakcyjną chłodzoną powietrzem.

Rozrzut grubości warstwy epitaksjalnej między płytkami wchodzącymi w skład jednego ładunku /12 szt./ nie przekraczał $\pm 10\%$, a między procesami - $\pm 12\%$ dla całego zakresu grubości.

Grubość warstwy określono przez pomiar boku trójkąta błędu wzrostu pod mikroskopem, w powiększeniu 400x, z dokładnością $\pm 0,2 \mu\text{m}$.

1. CHARAKTERYSTYKA PERFEKCJI STRUKTURALNEJ WARSTW

W miarę zwiększania grubości krzemowej warstwy epitaksjalnej wiele niedokładności strukturalnych ulegnie zmianie zarówno ilościowej, jak i jakościowej.

W czasie procesu krzem narasta również na grzejniku grafitowym, na którym są ułożone płytki, oraz na bocznych ściankach płytek. W rezultacie płytka z warstwą epitaksjalną jest obrosnięta krzemem polikrystalicznym, co wskutek powstałych naprężeń może spowodować wygięcie, a nawet pęknięcie płytki. Na obrzeżu płytki narasta dodatkowo tzw. "korona", którą należy usunąć mechanicznie przed procesem fotolitografii. Jej powstawanie jest nieuniknione ze względu na różnicę w szybkości wzrostu krzemu na różnych płaszczyznach krystalograficznych. Ponieważ stosunek szybkości wzrostu $V_{(111)} : V_{(1\bar{1}\bar{0})} : V_{(11\bar{5})} : V_{(100)}$ jest jak 1,0:2,3:1,9:2,2 [1], wysokość korony nad warstwą narosłą na płaszczyźnie (111) może osiągnąć wartość równą grubości warstwy.

Przeprowadzone próby wykazały, że dla ograniczenia pęknięcia i deformacji płytek podłożowych, jest konieczna szczególnie staranna obróbka mechaniczno-chemiczna płytek podłożowych, dzięki czemu nie powstają ukryte defekty w rodzaju zapolerowanych rys i wgłębień, będących centrami naprężeń.

Dla zmniejszenia szybkości wzrostu krzemu na obrzeżu płytki stosowano głębsze strawienie krzemu po szlifowaniu tak, aby otrzymać lekkie zaokrąglenie brzegów i utrzymać na obrzeżu płaszczyznę możliwie bliską (111).

Pojedyncze defekty strukturalne mają zwykle swój początek na powierzchni podłoża, a następnie rosną wraz z warstwą. I tak: powierzchnia ograniczona trójkątem błędu wzrostu wyraża się wzorem $S=0,715 d^2$, czyli dla grubości warstwy $d=100 \mu\text{m}$ wynosi $7 \times 10^3 \mu\text{m}^2$. Wysokość defektu typu trójpiramidy mierzona nad powierzchnią warstwy wynosi $h=0,19d$. Biorąc pod uwagę łatwość dyfuzji zanieczyszczeń, w tym szczególnie pierwiastków ciężkich metali, do obszarów przecięcia się płaszczyzny trójpiramid z warstwą, istnieje duże prawdopodobieństwo wystąpienia w tych miejscach przebicia lokalnego, które dyskwalifikuje złącze. Narosty wystające ponad warstwę mogą dodatkowo uniemożliwić prawidłowe wykonanie fotolitografii i zniszczyć maskę.

Dla wyeliminowania tego rodzaju defektów zastosowano dokładną kontrolę stanu powierzchni płytki podłożowej oraz zasadę mycia płytek bezpośrednio przed procesem epitaksji. Stosowano również trawienie gazowym HCl w komorze reakcyjnej, w temperaturze wyższej od temperatury, w której następował wzrost warstwy.

Gęstość jamek dyslokacyjnych w otrzymanych warstwach, po trawieniu w mieszaninie opartej no składnikach podanych przez Sirtla i Adlera, była mniejsza od 10^3cm^{-2} .

Dla oceny perfekcji strukturalnej grubych warstw epitaksjalnych określa się również gęstość dyslokacji niedopasowania. Wprowadza się pojęcie krytycznej grubości warstwy epitaksjalnej, powyżej której następuje generacja tego typu dyslokacji. Według Van der Merwe [2] wartość grubości krytycznej jest określona następującym warunkiem:

$$h_{kr} \frac{4\pi(1-\nu)^2 \cdot m}{(1-2\nu)l} + \ln\left(\frac{2\pi me}{1-\nu}\right) = 0 \quad (1)$$

gdzie: h_{kr} - krytyczna grubość warstwy epitaksjalnej,

l - odległość między sąsiednimi atomami, dla krzemu w płaszczyźnie (111),
 $l = 3,85 \text{ \AA}$,

ν - współczynnik Poissona, dla krzemu równy 0,3,

m - niedopasowanie sieciowe,

e - podstawa logarytmu naturalnego.

Niedopasowanie sieciowe, powstające na skutek wprowadzenia do warstwy innego rodzaju domieszki w warstwie i podłożu, lub różnych koncentracji domieszki w warstwie i podłożu, jest określone przez różnicę stałych sieciowych warstwy i podłoża. Wprowadzenie atomów domieszki o promieniu atomowym innym niż krzem powoduje deformację sieci:

$$\varepsilon = \beta \cdot N_i \quad (2)$$

gdzie: ε - średnia deformacja sieci,
 N_i - koncentracja domieszki w krzemie,
 β - współczynnik rozszerzenia sieci określony przez zależność:

$$\beta = \frac{1}{3} \left[1 - \left(\frac{R_i}{R_{Si}} \right)^3 \right] N^{-1} \quad (3)$$

gdzie: R_i - promień atomowy /kowalencyjny/ domieszki

R_{Si} - promień atomowy /kowalencyjny/ krzemu /1,17 Å/,

N - gęstość atomowa krzemu / 5×10^{22} atomów/cm³/.

Dla podłoża domieszkowanego antymonem do poziomu 5×10^{18} atomów/cm³ i warstwy epitaksjalnej domieszkowanej fosforem do poziomu 3×10^{14} atomów/cm³ podane powyżej wielkości przedstawiono w tabl. 1.

Tablica 1

Krytyczna grubość warstwy epitaksjalnej

	Domieszka	R_i (Å)	N_i (atomów/ /cm ³)	β	ε	h_{kr} µm
				atomów/cm ³		
Podłoże	Sb	1,37	5×10^{18}	$-3,8 \times 10^{-24}$	$-1,9 \times 10^{-5}$	10
Warstwa	P	1,10	3×10^{14}	$+1,03 \times 10^{-24}$	$+3,3 \times 10^{-10}$	

Z tablicy 1 wynika, że w omawianym przypadku powinny generować się dyslokacje niedopasowania w warstwie o grubości powyżej 10 µm.

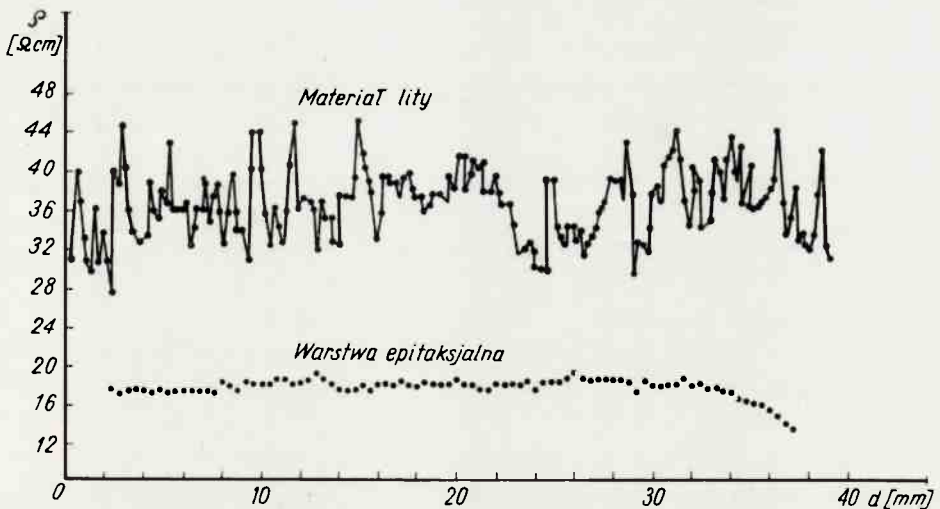
Badania prowadzone w Pracowni Rentgenograficznej Zakładu Badań Strukturalnych ONPMP za pomocą metody topografii transmisyjnej w układzie z kamerą Langa [3], nie ujawniły dyslokacji niedopasowania w warstwach o grubości poniżej 30 µm. Różnica z wyliczoną wartością grubości krytycznej może wynikać z faktu, że dopasowanie sieciowe nie jest realizowane skokowo, lecz w obszarze przejściowym na granicy podłoże-warstwa epitaksjalna.

W warstwach o grubości powyżej 30 µm ujawniono siatkę dyslokacji niedopasowania, których gęstość zwiększa się wraz ze wzrostem grubości warstwy - rysunek 1 i 2. Ich wpływ na parametry elektryczne przyrządów półprzewodnikowych nie został dotychczas zbadany.

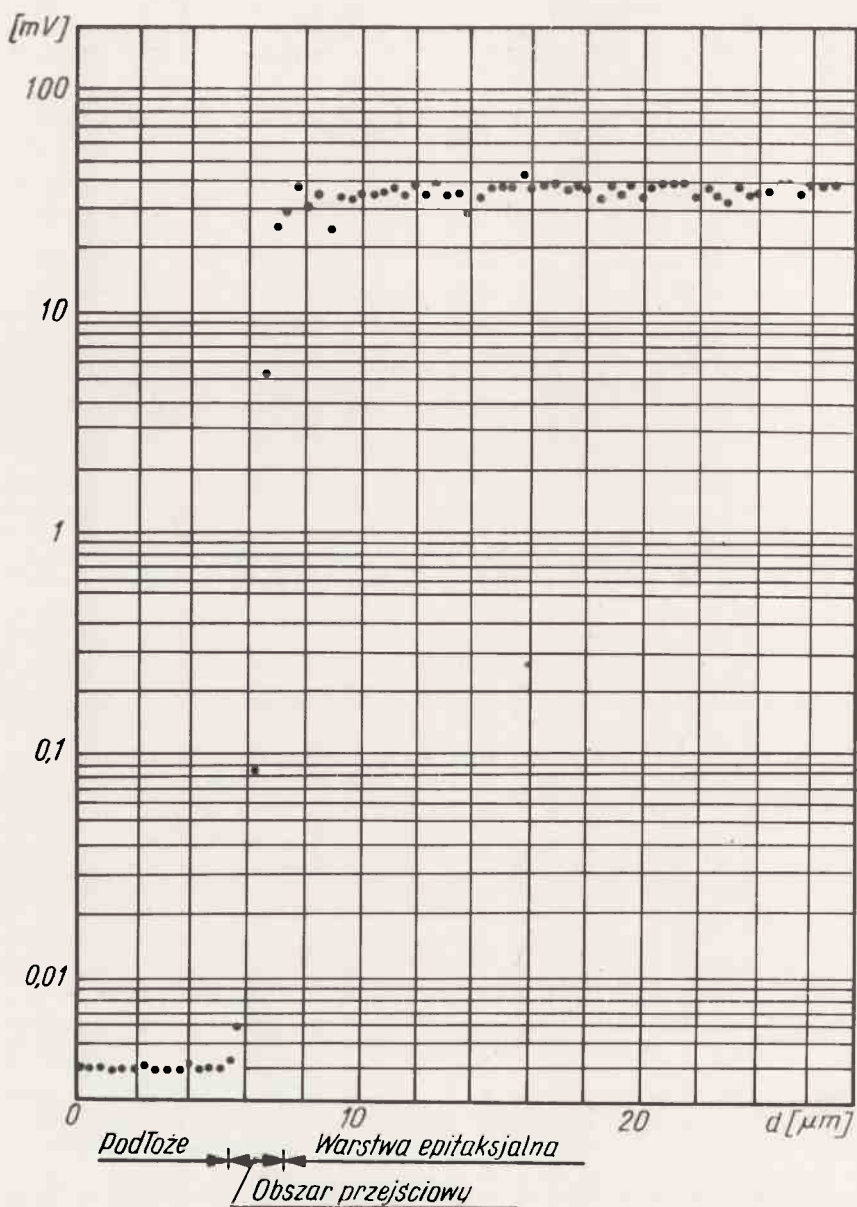


Rys. 1. Topografia transmisyjna warstwy epitaksjalnej krzemu o grubości 47 μm

Rys. 2. Topografia transmisyjna warstwy epitaksjalnej krzemu o grubości 80 μm



Rys. 3. Rozkład rezystywności na powierzchni płytki krzemowej wykonanej z materiału litego i na powierzchni warstwy epitaksjalnej o grubości 50 μm / pomiar wykonano w Zakładzie Badań Materiałów Półprzewodnikowych ONPMP/



Rys. 4. Profil rezystywności w warstwie epitaksjalnej krzemu o grubości $d=35 \mu\text{m}$ i średniej rezystywności $\rho = 11 \Omega \cdot \text{cm}$ /pomiar wykonano w Zakładzie Badań Materiałów Półprzewodnikowych ONPMP/

2. PARAMETRY ELEKTRYCZNE WARSTWY EPITAKSJALNEJ

W przeprowadzonej pracy otrzymywane warstwy epitaksjalne typu N, domieszkowane fosforem, o rezystywności $10\text{--}50 \Omega \cdot \text{cm}$.

Pomiar rezystywności prowadzono na płytkach kontrolnych metodą sondy czterostrzowej.

Rozrzut rezystywności w jednym procesie nie przekroczył $\pm 10\%$, a między procesami o jednakowych warunkach domieszkowania wynosił poniżej $\pm 15\%$.

Rozkład rezystywności na powierzchni warstwy wzdłuż średnicy przedstawiono na rys. 3.

Profil rezystywności w głąb warstwy epitaksjalnej określono metodą rezystancji rozprętu, przyjętą w ONPMP do oceny jakości warstw epitaksjalnych. Na rysunkach 4, 5 i 6 pokazano rozkłady rezystywności w warstwach o różnych grubościach.

Dodatkowo wykonano serię procesów bez celowego domieszkowania warstwy i uzyskano w nich rezystywność w granicach $150\text{--}400 \Omega \cdot \text{cm}$. Rozkład koncentracji domieszki w głąb warstwy określono metodą pojemnościowo-napięciową /rys. 7/.

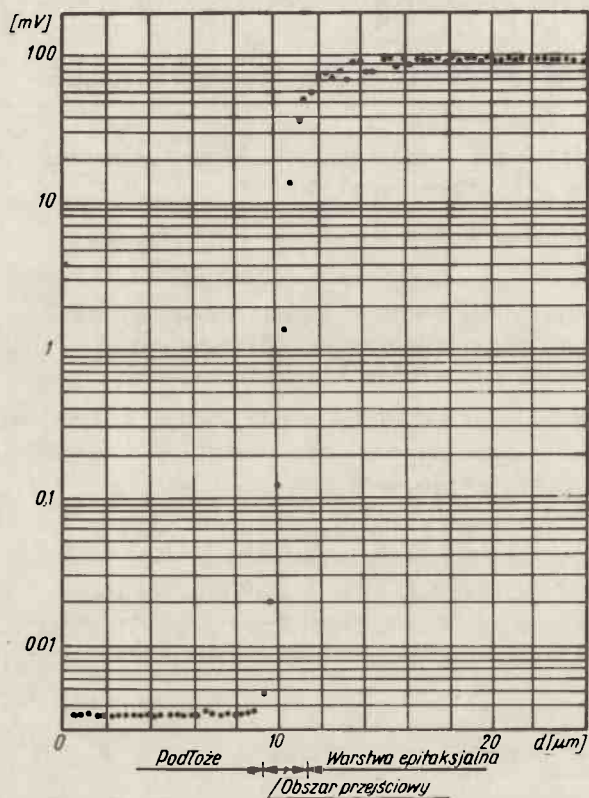
W otrzymanych warstwach określono również czasy życia nadmiarowych nośników prądu przez pomiar drogi dyfuzji za pomocą metody spektrofotometrycznej [4]. Wyniki przedstawiono w tabl. 2 dla tych samych warstw, których profile są pokazane na rys. 4, 5 i 6. Otrzymane wartości są porównywalne z czasami życia nośników mniejszościowych w monokryształach krzemu.

Tablica 2

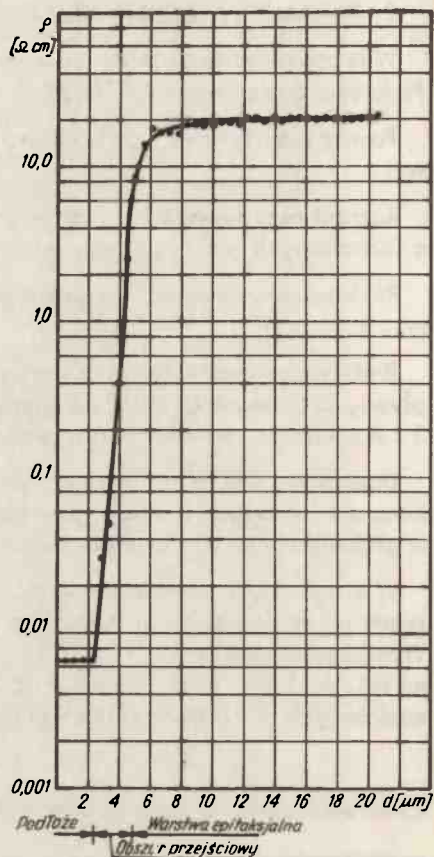
Zmierzone czasy życia nośników mniejszościowych^x

Nr rys. profilu Parametr	4	5	6
Koncentracja donorów [atomów/cm ³]	$4,4 \times 10^{14}$	$1,4 \times 10^{14}$	$1,1 \times 10^{14}$
Droga dyfuzji [μm]	90	290	320
Czas życia [μs]	6	68	82

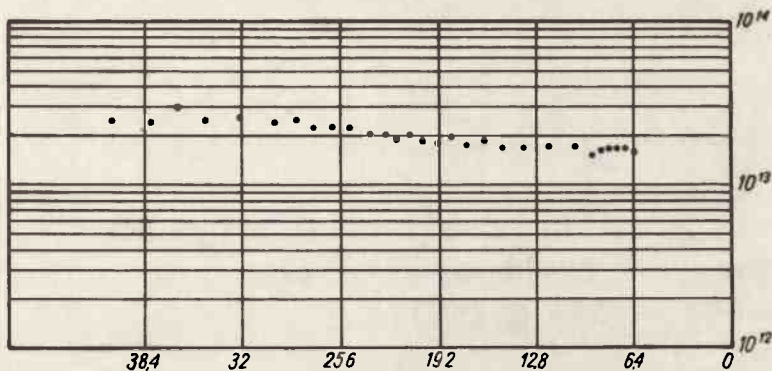
^x Pomiary wykonano w ITE, Pion Miernictwa



Rys. 5. Profil rezystywności w warstwie epitaksjalnej krzemu o grubości $d = 55 \mu\text{m}$ i średniej rezystywności $\rho = 36 \Omega \cdot \text{cm}$ /pomiar wykonano w Zakładzie Badań Materiałów Półprzewodnikowych ONPMP/



Rys. 6. Profil rezystywności w warstwie epitaksjalnej krzemu o grubości $d = 120 \mu\text{m}$ i średniej rezystywności $\rho = 44 \Omega \cdot \text{cm}$ /pomiar wykonano w Zakładzie Badań Materiałów Półprzewodnikowych ONPMP/



Rys. 7. Profil koncentracji domieszki w warstwie epitaksjalnej krzemu o grubości $d = 75 \mu\text{m}$ i rezystywności rzędu $400 \Omega \cdot \text{cm}$ zmierzony metodą pojemnościowo-napięciową. Obszar przy powierzchni warstwy /pomiar wykonano w ITE przez pracownię z Pionu Miernictwa/

3. PODSUMOWANIE

1. Powtarzalność parametrów warstw otrzymanych w ustalonych warunkach technologicznych jest zadowalająca. Rozrzuty rezystywności i grubości warstw mieszczą się w granicach tolerancji podawanych przez producentów zagranicznych oraz przyjętych dla warstw o grubościach $10\text{--}20 \mu\text{m}$.
2. Rozkład rezystywności na powierzchni wskazuje na znaczne polepszenie jednorodności rozkładu domieszki w stosunku do monokryształów wyciąganych z fazy ciekłej /zob. rys. 3/.
3. Czas życia nośników mniejszościowych jest porównywalny z odpowiednimi materiałami litymi.
4. Obszar przejściowy na granicy podłoże - warstwo obejmuje nie więcej niż 5% grubości warstwy.
5. W warstwach o grubościach powyżej $30 \mu\text{m}$ stwierdzono występowanie dyslokacji niedopasowania. Ich wpływ na parametry elektryczne przyrządów półprzewodnikowych nie został dotychczas zbadany.

Przewiduje się, że warstwy epitaksjalne o grubości powyżej $30 \mu\text{m}$ mogą być wykorzystane jako materiał wyjściowy do produkcji diod wysokonapięciowych i przyrządów wysokiej mocy.

Literatura

1. Rai-Choudhury P., Schroder D. K.: J. Electrochem. Soc. 120, 664, 1973
2. Van der Merwe J. H.: J. Appl. Phys. 34, 117, 123, 1963
3. Sass J.: Materiały Elektroniczne 5, 7, 1974
4. Świderski J.: Archiwum Elektroniki XIV, 3, 1965