

Krzemowe warstwy epitaksjalne do mikrofalowych diod przestrajających

Przedstawiono warunki wzrostu epitaksjalnego cienkich, wielowarstwowych struktur krzemowych przeznaczonych do wytwarzania mikrofalowych diod przestrajających. Otrzymane parametry warstw epitaksjalnych i ich tolerancje pokazano na wykresach i w tablicach.

1. WSTĘP

W technologii mikrofalowych diod przestrajających mogą być zastosowane krzemowe struktury epitaksjalne o zmiennej koncentracji większościowych nośników ładunku, typu $n^+/n/n^+$. Pozwala to na znaczne uproszczenie technologii diody dzięki wyeliminowaniu procesu dyfuzji lub implantacji fosforu. Podłoże i struktura epitaksjalna domieszkowane są arsenem. Odfizywanie krzemowych, cienkich struktur epitaksjalnych o zadanym profilu koncentracji domieszki, wymaga precyzyjnego sterowania procesem wzrostu. W przypadku epitaksji na podłożu silnie domieszkowanym arsenem, który łatwo odparowuje z powierzchni płytki, konieczne jest ograniczenie zjawiska samodomieszkowania warstwy podczas jej wzrostu.

2. PARAMETRY STRUKTURY EPITAKSJALNEJ

Do wytwarzania diod przestrajających stosowana jest struktura składająca się z trzech obszarów epitaksjalnych osadzonych na niskorezystywnym podłożu.

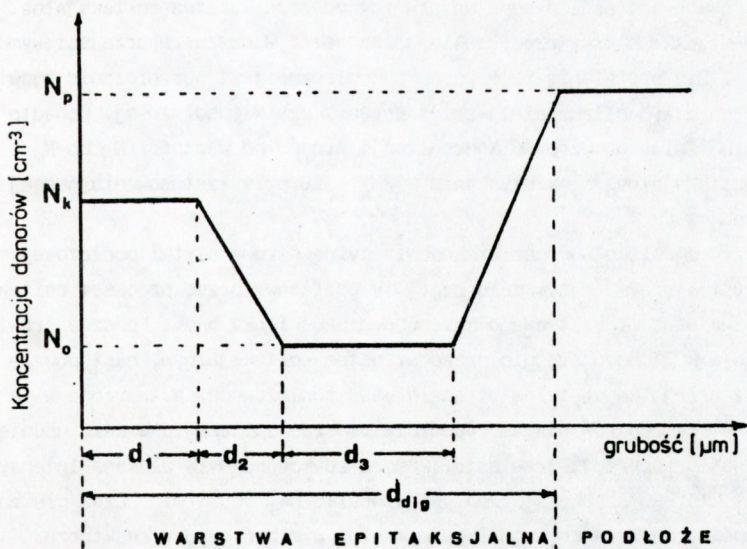
Schematyczny rozkład koncentracji domieszki w głąb płytki krzemowej pokazany jest na rys. 1.

Typowe wartości parametrów określające rozkład koncentracji donorów w strukturze epitaksjalnej:

$$d_{dig} = 2.3 - 2.8 \mu\text{m};$$

$$d_1 = 0.5 - 0.7 \mu\text{m}, \quad d_2 = 0.4 - 0.5 \mu\text{m}, \quad d_3 = 0.7 - 0.9 \mu\text{m};$$

$$N_0 = 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ lub } 1.2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}, \quad N_k = 2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}; \text{ z tolerancją } \pm 20\%.$$



Rys. 1. Założony schematyczny rozkład koncentracji domieszki donorowej w warstwie epitaksjalnej

- d_{dig} - całkowita grubość struktury epitaksjalnej
- d_1 - grubość obszaru przypowierzchniowego
- d_2 - grubość obszaru o zmiennej koncentracji domieszki
- d_3 - grubość obszaru wewnętrznego
- N_0 - początkowa koncentracja domieszki
- N_k - końcowa koncentracja domieszki
- N_p - koncentracja domieszki w podłożu

Jako podłoże dla warstwy epitaksjalnej stosuje się płytki z krzemu monokrystalicznego CZ o orientacji krystalograficznej $\langle 111 \rangle$. Płytki podłożowe domieszkowane były arsenem do koncentracji $1-8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, co odpowiada rezystywności $0.005-0.001 \ \Omega \text{ cm}$.

3. OPTIMALIZACJA WARUNKÓW PROWADZENIA PROCESU EPITAKSJI

Warstwy epitaksjalne otrzymywano metodą chemicznego osadzania z fazy gazowej (CVD) przy ciśnieniu gazów w reaktorze 1 atm. Gazem nośnym był wodór, źródłem krzemu - czterochlorek krzemu, a źródłem domieszki - arsenowodór w wodorze o stężeniu 200 ppm.

Procesy epitaksji prowadzono w urządzeniu do epitaksji Gemini-1. Jest to urządzenie z grzanym indukcyjnie, obrotowym grzejnikiem grafitowym w kształcie talerza. Generator w.c.z. jest sprzężony z układem kontrolującym temperaturę płytek Si na grzejniku. Przepływ gazów jest kontrolowany i regulowany przy pomocy przepływomierzy masowych. Sterowanie w układzie automatycznym realizuje sekwenser BCS-900 Berghof z mikroprocesorem. Standardowy proces epitaksji prowadzony jest w temperaturze $1150-1180^\circ\text{C}$ z szybkością wzrostu około $1 \ \mu\text{m}/\text{min}$.

Jednym z podstawowych problemów technologicznych związanych z wytworzeniem struktury epitaksjalnej o rozkładzie koncentracji donorów przedstawionym na rys. 1 jest uzyskanie

dużego gradientu koncentracji arsenu na granicy podłoże-warstwa epitaksjalna. Zmiana koncentracji domieszki o trzy rzędy powinna zachodzić w obszarze przejściowym nie grubszym niż 0.8 μm . Dla spełnienia tego warunku konieczne jest ograniczenie zjawiska samodomieszkowania warstwy epitaksjalnej przez arsen z płytki podłożowej. Ponadto konieczne jest zapewnienie liniowego wzrostu koncentracji arsenu od wartości N_0 do N_k w obszarze d_2 struktury epitaksjalnej oraz uzyskanie $N_0/N_k = 20$ przy zastosowaniu jednej butli z arsenowodorem.

Aby ograniczyć zjawisko samodomieszkowania tylną stronę płytki podłożowej maskowano krzemem polikrystalicznym. W tym celu grzejnik grafitowy przed procesem epitaksji był pokrywany warstwą niedomieszkowanego krzemu o grubości ok. 5 μm . Podczas trawienia płytek podłożowych w HCl, bezpośrednio przed wzrostem epitaksjalnym, następowało przeniesienie krzemu z grzejnika na tylną stronę płytek podłożowych. Wytworzona w ten sposób warstwa Si zapobiega odparowaniu As z podłoża podczas epitaksji. W celu usunięcia arsenu z fazy gazowej po operacji trawienia, komora reakcyjna była płukana intensywnym strumieniem wodoru, którego szybkość przepływu wynosiła ok. 500 l/min. Czas płukania był tak dobrany aby zapewniona była co najmniej 10-krotna wymiana gazu w reaktorze.

Na koncentrację As w warstwie epitaksjalnej mają wpływ następujące czynniki: ciśnienie cząstkowe As w fazie gazowej, temperatura wzrostu warstwy, szybkość wzrostu warstwy. Zależność koncentracji domieszki w warstwie od ciśnienia cząstkowego AsH_3 była omawiana w pracy [1]. W interesującym zakresie koncentracji As (1×10^{16} – 2×10^{17} cm^{-3}) zależność ta ma charakter liniowy, a więc ciśnienie cząstkowe AsH_3 w reaktorze należy zwiększyć 20-krotnie. Układ domieszkujący w urządzeniu Gemini-1 pozwala na taką zmianę. Trudność polegała na uzyskaniu górnej wartości koncentracji As w warstwie przy dozowaniu arsenowodoru z butli o stężeniu 200 ppm (najwyższe stężenie, jakie oferował dostawca arsenowodoru).

Aby zwiększyć koncentrację arsenu w warstwie epitaksjalnej wykorzystano następujące zależności:

- z obniżeniem temperatury procesu epitaksji rośnie koncentracja arsenu wbudowującego się do warstwy krzemowej,
- z obniżeniem szybkości wzrostu warstwy, przy zachowaniu stałej temperatury płytki, koncentracja arsenu w warstwie rośnie.

A zatem, dla uzyskania dużej koncentracji arsenu należy obniżyć zarówno temperaturę jak i szybkość wzrostu warstwy. W przypadku cienkich struktur jest to bardzo korzystna relacja, gdyż mała szybkość wzrostu zapewnia lepszą kontrolę grubości poszczególnych obszarów, zaś obniżona temperatura osadzania poprawia perfekcję strukturalną warstwy, ponieważ spełnione są warunki zapewniające kontrolę kinetyki wzrostu przez procesy dyfuzji w fazie gazowej [2]. Obniżenie temperatury epitaksji spowalnia również proces dyfuzji arsenu w krzemie, co jest szczególnie ważne dla zachowania dużego gradientu koncentracji arsenu na granicy podłoże-warstwa.

W wyniku prób doboru temperatury i szybkości wzrostu ustalono, że zadane parametry otrzymuje się stosując temperaturę wzrostu 1100°C i szybkości wzrostu 0.4 $\mu\text{m}/\text{min}$. W tych warunkach układ domieszkujący urządzenia Gemini-1 zapewnia otrzymanie koncentracji As w warstwie 2×10^{17} cm^{-3} dla butli AsH_3 o stężeniu ok. 200 ppm.

Perfekcja strukturalna warstwy epitaksjalnej ulega znacznemu pogorszeniu, jeżeli następuje przerwa we wzroście epitaksjalnym spowodowana np. koniecznością zmiany przepływów poszczególnych reagentów. Opracowano program sterujący, który wprowadzał zmiany nastawów przepływomierzy w układzie domieszkującym w trakcie wzrostu struktury epitaksjalnej, bez przerywania jej wzrostu.

4. POMIAR PARAMETRÓW OTRZYMANYCH STRUKTUR EPITAKSJALNYCH

W cienkiej, wielowarstwowej strukturze epitaksjalnej, jaką jest struktura przeznaczona do produkcji mikrofalowych diod przestrajających, istotnym elementem technologii jest prawidłowy pomiar uzyskanych parametrów. Pomiarowi podlegają:

- grubość sumaryczna struktury;
- grubości poszczególnych obszarów epitaksjalnych (d_1, d_2, d_3);
- koncentracja domieszki (N_o, N_k);
- profil koncentracji domieszki w obszarze d_2 .

Stosowano następujące metody pomiarowe:

- grubość sumaryczna i jej rozrzut na płycie określano metodą interferencyjną na spektrofotometrze Digilab FIG12;
- rozkład koncentracji domieszki w strukturze określano metodą pojemnościowo-napięciową (C-V) z użyciem sondy rtęciowej;
- profil rezystywności wyznaczono przez pomiar oporności rozprzysku (spreading resistance -SR) styku punktowego metal-półprzewodnik na szlifie skośnym.

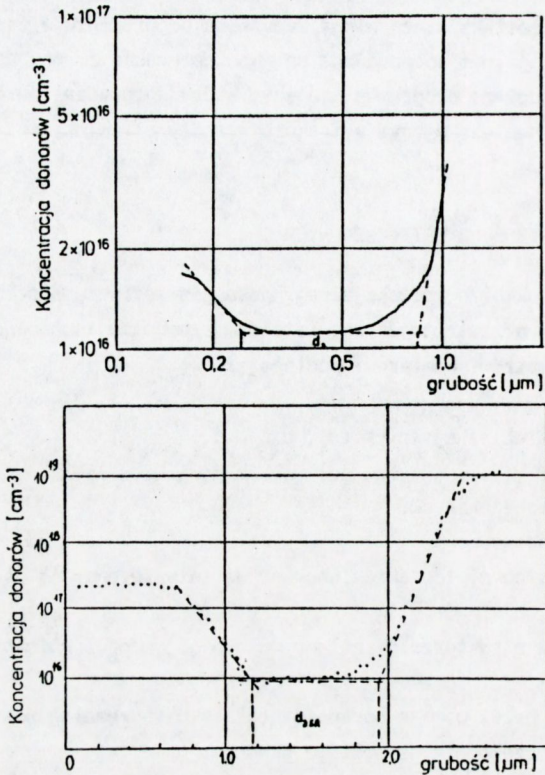
Metoda C-V pozwala zmierzyć koncentrację domieszki w ograniczonym obszarze warstwy epitaksjalnej, uwarunkowanym szerokością warstwy ładunku przestrzennego. Minimalna odległość od powierzchni wyznaczona jest przez szerokość warstwy ładunku przestrzennego przy polaryzacji zerowej, a maksymalna - szerokością tej warstwy, odpowiadającą napięciu przebicia. Przykładowo, dla koncentracji 10^{16} cm^{-3} pomiar obejmuje obszar 0.25-1.05 μm od powierzchni. Metodą tą można otrzymać informacje o koncentracji domieszki w głębszych obszarach struktury, stawiając kolejne fragmenty warstwy.

Pomiar koncentracji donorów w obszarze przejściowym przy podłożu jest możliwy tylko do wartości $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ze względu na duże upływności kontaktu Schottky'ego. Pomiarzy wykonano stosując zestaw pomiarowy złożony z testera TMP-79 i probera PRC 1-83 (PIE).

Metodą SR można wyznaczyć rozkład rezystywności w całej strukturze epitaksjalnej i dobrze ocenić grubości poszczególnych obszarów. Na dokładność tej metody duży wpływ mają: prawidłowe określenie kąta szlif, ostrość krawędzi szlif i sposób cechowania testera. Błąd w określeniu położenia krawędzi szlif, który spowodowany jest jej zaokrągleniem, wpływa przede wszystkim na dokładność pomiaru grubości obszaru przy powierzchni warstwy (d_1). Zastosowano zestaw pomiarowy złożony z probera PST-86/M i testera TST-86/M (PIE). Cechowanie miernika zostało przeprowadzone w oparciu o pomiar metodą C-V na warstwach epitaksjalnych typu n osadzonych na niskorezystywnym podłożu n+.

W oparciu o pomiary C-V i SR tego samego fragmentu płytki - rys. 2a, 2b - oraz z porównania grubości struktury zmierzonej za pomocą spektrofotometru i określonej z wykresu SR znaleziono, że interferencja promieniowania podczerwonego zachodzi pomiędzy wiązką

a)



Rys. 2. Rozkład koncentracji domieszki donorowej w strukturze epitaksjalnej, zmierzony metodami:

- a) C-V
b) SR (... punkty pomiarowe)

5. OCENA OTRZYMANÝCH WYNIKÓW

Dla zilustrowania jednorodności parametrów oraz powtarzalności procesów otrzymane parametry zebrano w tabelach 1 - 3.

Ocenie poddano partię około 200 szt. płytek o średnicy dwóch cali, otrzymanych w czterech kolejnych procesach epitaksji. Pomiaru całkowitej grubości struktury w środku płytki wykonano dla wszystkich płytek. Pozostałe parametry, ze względu na niszczący charakter pomiaru, były kontrolowane w trzech losowo wybranych płytkach z każdego procesu epitaksji.

W tabelicy 1 podano wyniki pomiarów grubości. W procesie A 30% płytek miało grubość mniejszą od wymaganej. Po korekcie czasu osadzania w następnych procesach grubość struktury epitaksjalnej była zgodna z założoną. Rozrzut grubości na poszczególnych płytkach (pomiar w pięciu punktach) był poniżej 6%.

Wyniki pomiaru koncentracji domieszek (N_D , N_A) oboma stosowanymi metodami podano w tabelicy 2. Uzyskane wartości mieszczą się w wymaganym zakresie - rozrzut wartości nie przekracza $\pm 20\%$.

Wyznaczone na podstawie wykresów SR grubości poszczególnych obszarów struktury przedstawione są w tabelicy 3. W procesach B, C, D grubość warstwy zewnętrznej (d_1) jest

odbitą od powierzchni warstwy i wiązką odbitą od granicy warstwa-podłoże, której odpowiada koncentracja donorów ok. $8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ (przy koncentracji arsenu w płytce podłożowej $1-2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$).

Procedura pomiarowa sprowadza się zatem do:

- pomiaru całkowitej grubości struktury epitaksjalnej na spektrofotometrze (d_{dig}),
- pomiaru początkowej i końcowej koncentracji domieszki (N_k , N_0) metodą C-V z podtrawianiem krzemu,
- wyznaczenia w oparciu o wykresy SR grubości: d_{1SR} , d_{2SR} , d_{3SR} po uwzględnieniu współczynnika błędów kąta szlifowania $Q = d_{\text{dig}}/d_{SR}$,
- określenia profilu rezystywności w strukturze, a zwłaszcza w obszarze d_2 na podstawie pomiaru SR

w górnej granicy, a nawet ją nieco przekracza (parametr ten skorygowano w następnych procesach), natomiast pozostałe obszary we wszystkich badanych płytkach miały grubość zgodną z wymaganiami.

Tablica 1. Całkowita grubość struktury epitaksjalnej

Numer procesu	Liczba płytek w procesie	Otrzymany zakres grubości, d_{dig} (μm)	2 x odchyl. stand. ($2 \sigma_x$)
A	46	2.1 - 2.5	0.18
B	46	2.4 - 2.8	0.22
C	47	2.3 - 2.7	0.17
D	47	2.4 - 2.8	0.16

Tablica 2. Koncentracja domieszki N_o i N_k określone metodami C-V i SR

Numer procesu	Koncentracja domieszki (cm^{-3})			
	N_o (C-V)	N_o (SR)	N_k (C-V)	N_k (SR)
A	1.05×10^{16}	9.9×10^{15}	2.4×10^{17}	2.3×10^{17}
B	1.05×10^{16}	9.5×10^{15}	2.0×10^{17}	2.2×10^{17}
C	1.20×10^{16}	1.25×10^{16}	1.8×10^{17}	1.9×10^{17}
D	1.20×10^{16}	1.30×10^{16}	1.7×10^{17}	2.1×10^{17}

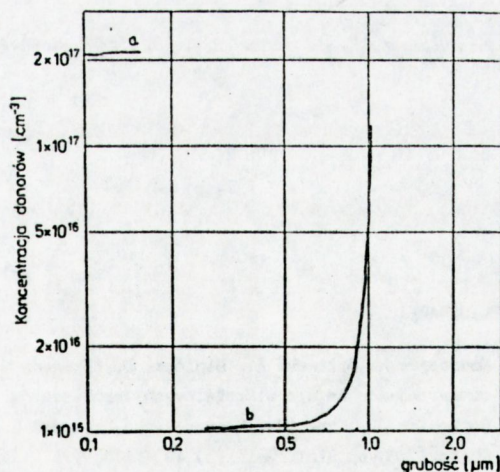
Tablica 3. Grubości poszczególnych obszarów struktury

Numer procesu	Grubość (μm)			
	d_1	d_2	d_3	d_{dig}
Założone grubości	0.5-0.7	0.4-0.5	0.7-0.9	2.3-2.8
A	0.61	0.43	0.70	2.30
B	0.73	0.46	0.86	2.72
C	0.71	0.44	0.87	2.54
D	0.71	0.50	0.79	2.58

Rys. 3. Określenie koncentracji N_o i N_k metodą C-V

krzywa a - koncentracja domieszki donorowej przy powierzchni struktury epitaksjalnej

krzywa b - koncentracja domieszki w obszarze przejściowym podłoże-warstwa



Krzywą b otrzymano po strawieniu około $1 \mu\text{m}$ struktury

Przykładowe rozkłady koncentracji donorów w strukturze epitaksjalnej mierzone metodą SR pokazano na rys. 2b, a zmierzone metodą C-V na rys. 3.

6. PODSUMOWANIE

Metodą epitaksji z fazy gazowej, na silnie domieszkowanych arsenem krzemowych płytkach podłożowych, otrzymano cienkie struktury epitaksjalne z zadaniem profilem koncentracji arsenu. Proces epitaksji prowadzono w temperaturze 1100°C z szybkością wzrostu 0.4 $\mu\text{m}/\text{min.}$, używając czterochloru krzemu jako źródła krzemu. Przedstawiono procedurę pomiarową pozwalającą na określenie parametrów poszczególnych obszarów struktury. Płytki krzemowe ze strukturami epitaksjalnymi tego typu znajdują zastosowanie w produkcji mikrofalowych diod przestrajających.

BIBLIOGRAFIA

1. Nossarzewska-Orłowska E., Lipiński D., Skwarcz J., Sarnecki J.: Krzemowe warstwy epitaksjalne domieszkowane As dla mikrofalowych tranzystorów typu npn. Materiały elektroniczne 4. 1986, 24
2. Borkowicz J., Korec J., Nossarzewska-Orłowska E.: Optimum Growth Conditions in Silicon Vapour Epitaxy. Phys. Stat. Sol. (a) 48, 1978, 225