

Krzemowe warstwy epitaksjalne domieszkowane As dla mikrofalowych tranzystorów typu npn

1. WSTĘP

Dążeniem konstruktorów mikrofalowych tranzystorów bipolarnych, do wytwarzania których stosuje się obecnie prawie wyłącznie warstwy epitaksjalne, jest zwiększenie iloczynu mocy admysyjnej i częstotliwości granicznej. Dla osiągnięcia jak najwyższych częstotliwości granicznych konieczna jest minimalizacja oporności szeregowej i pojemności wnoszonych przez strukturę tranzystora i jego obudowę. Oznacza to tendencję do zmniejszenia wymiarów liniowych struktur tranzystorowych i głębokości złącz.

Podstawową możliwością obniżenia oporności szeregowej jest zastosowanie technologii epiplanarnej z wykorzystaniem płytek podłożowych silnie domieszkowanych arsenem do koncentracji $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. Standardowo w technologii epiplanarnej elementów dyskretnych wysokiej częstotliwości są używane krzemowe płytki podłożowe domieszkowane antymonem do poziomu $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Zastosowanie płytek podłożowych domieszkowanych As zmniejsza nie tylko rezystancję w objętości podłoża, lecz przede wszystkim rezystancję kontaktu metal-półprzewodnik.

Małe wielkości struktur tranzystorowych stawiają wysokie wymagania co do jednorodności materiału wyjściowego /mikro- i makroniejednorodności rozkładu domieszki/, stanu naprężeń wewnętrznych na granicy podłoże-warstwa oraz płaskorównoległości i wygięcia płytek.

Naprężenia w obszarze przejściowym podłoże monokrystaliczne-warstwa epitaksjalna są wywołane głównie różnicą promieni kowalentnych atomów domieszki podłoża i warstwy epitaksjalnej. Naprężenia te można w istotny sposób zmniejszyć przez zastosowania arsenu jako domieszki w podłożu i warstwie w przypadku struktur n^+/n . Promień kowalentny atomu As (1,18 Å) jest najbardziej zbliżony do promienia kowalentnego atomu Si (1,17 Å).

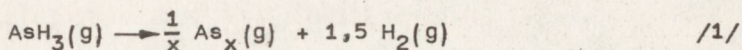
Stosowanie jako podłoża krzemu monokrystalicznego silnie domieszkowanego As wymaga ograniczenia efektu samodomieszkowania.

2. EPITAKSJA WARSTW KRZEMOWYCH DOMIESZKOWANYCH ARSENIEM

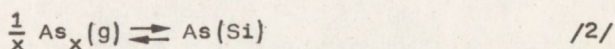
Procesy epitaksji warstw krzemu z arsenem jako domieszką są dosyć dokładnie omówione w pracach [1,2,3]. Bardziej szczegółowe badania przeprowadził Rai-Choudhury wraz ze współpracownikami w układzie H_2 - AsH_3 - $SiCl_4$ [3] oraz Reif dla układu H_2 - AsH_3 - SiH_4 [4].

Analogicznie jak dla innych domieszek grupy V (P i Sb) proces domieszkowania arsenem polega na kontrolowanym dostarczaniu do gazu nośnego H_2 , w trakcie wzrostu epitaksjalnej warstwy krzemu, odpowiedniego wodorku danej domieszki, w tym przypadku AsH_3 .

Arsenowodór podobnie jak PH_3 i SbH_3 jest związkami niestabilnymi w zakresie temperatur epitaksji 1200-1600 K i ulega w fazie gazowej rozkładowi zgodnie z reakcją:



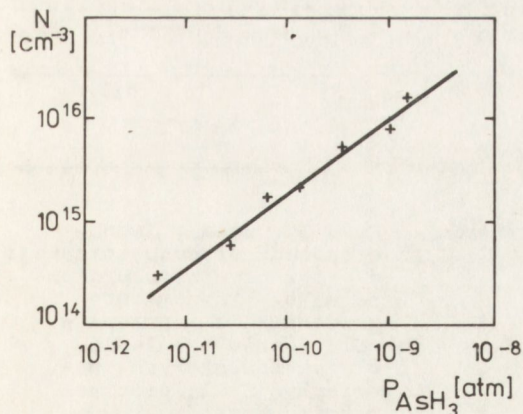
Wbudowywanie się arsenu do rosnącej warstwy krzemu opisuje reakcja:



Na koncentrację arsenu w warstwie mają wpływ następujące czynniki: ciśnienie cząstkowe arsenowodoru w fazie gazowej, temperatura epitaksji, szybkość wzrostu warstw oraz szybkość przepływu gazu nośnego. Wpływ dwóch pierwszych czynników jest dominujący.

Zależność koncentracji As w epitaksjalnej warstwie krzemu w zakresie koncentracji wymaganej dla mikrofalowych tranzystorów npn $/1,5-7,2 \times 10^{15} /cm^{-3}$ w funkcji zmian ciśnienia cząstkowego AsH_3 przedstawia rys. 1.

Przebieg zależności koncentracji domieszki w warstwie od ciśnienia cząstkowego AsH_3 jest prostoliniowy do wartości ciśnienia cząstkowego 10^{-6} atm^{x/}, w kierunku większych ciśnień zmniejsza się kąt nachylenia prostej opisującej tę zależność.



Rys. 1. Koncentracja domieszki w epitaksjalnej warstwie Si w funkcji ciśnienia cząstkowego AsH_3

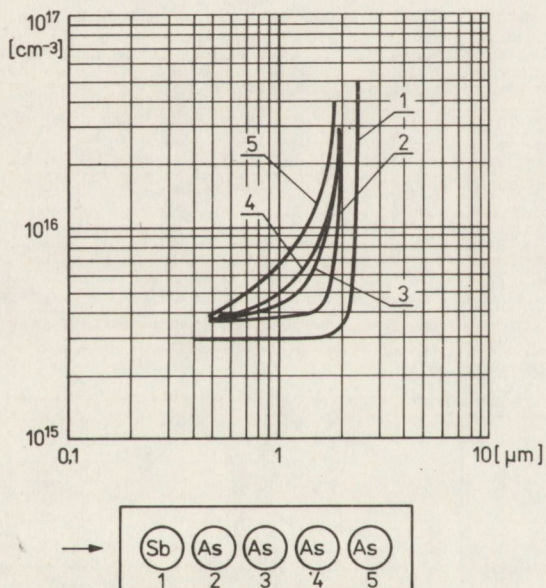
x/ 1 atm = $1,01325 \cdot 10^5$ Pa /przeliczenie dotyczy całego artykułu/

Z obniżeniem temperatury procesu epitaksji rośnie koncentracja arsenu wbudowywanego do warstwy krzemowej, w tym samym kierunku działa obniżenie szybkości wzrostu warstwy przy zachowaniu stałej temperatury wzrostu.

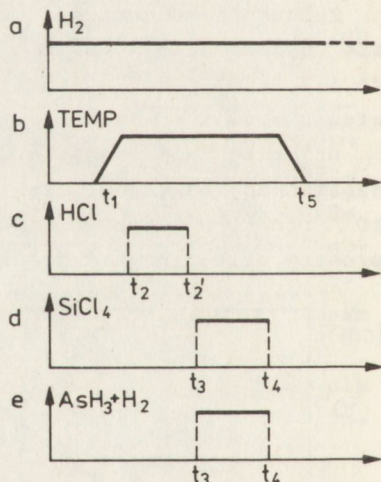
2.1. Zjawisko samodomieszkowania

Zjawisko samodomieszkowania, które polega na przenoszeniu domieszki z podłoża i jej wbudowywaniu do warstwy epitaksjalnej, wpływa w sposób decydujący na profil koncentracji na granicy podłoża-warstwa i ogranicza w dużym stopniu możliwość uzyskiwania skokowego złącza.

Próby osadzania warstw epitaksjalnych domieszkowanych As na podłożu domieszkowanym Sb w standardowym, jednoetapowym procesie wzrostu, w warunkach stosowanych dla płytek podłożowych domieszkowanych Sb i cienkich warstw domieszkowanych P w obniżonej do 1373 K temperaturze, pozwoliły na ocenę efektu samodomieszkowania. Płytki zostały umieszczone na grzejniku w konfiguracji przedstawionej na rys. 2. Schemat przebiegu procesu epitaksji ilustruje rys. 3.



Rys. 2. Profile koncentracji nośników mierzone metodą C-V



Rys. 3. Schemat jednoetapowego procesu epitaksji
a - przepływ wodoru głównego, b - temperatura grzejnika, c - przepływ HCl podczas trawienia płytek podłożowych, d - przepływ SiCl_4 podczas wzrostu warstwy
 t_1 - włączenie układu grzania, t_2-t_2' - trawienie płytek podłożowych, t_3-t_4 - wzrost epitaksjalny

Płytką podłożową domieszkowana Sb /nr 1/ stanowi płytkę odniesienia. W wyniku otrzymano warstwy na kolejnych płytkach podłożowych domieszkowanych As, w których profil koncentracji domieszki wyraźnie rozmywa się wzdłuż grzejnika, jednocześnie wzrasta poziom koncentracji domieszki - rys. 2. Efekt "rozmycia" jest wynikiem uwalniania się domieszki As z płytek podłożowych. Domieszka wbudowana do warstwy na płytce nr 5 jest sumą domieszek - domieszki uwolnionej z kolejnych płytek oraz domieszki dostarczonej przez układ domieszkujący urządzenia do epitaksji.

Rozmyty profil koncentracji nośników w obszarze przejściowym znacznie pogarsza parametry elektryczne tranzystorów mikrofalowych, stąd też dążenie do uzyskania możliwie dużego gradientu zmian koncentracji nośników w tym obszarze.

W zakładzie Epitaksji ITME zastosowano, celem ograniczenia zjawiska samodomieszkowania, wieloetapowy wzrost warstwy epitaksjalnej. Dokładny opis metody wieloetapowego prowadzenia procesu epitaksji znajduje się w patencie P.244741 [5] i został przedstawiony w artykule [6].

2.2. Charakterystyka procesu epitaksji

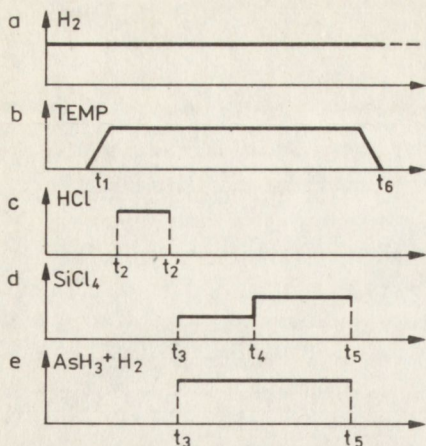
Procesy epitaksji były przeprowadzone w urządzeniu Epilogic 15-2 firmy ASM z reaktorem poziomym, w którym grzejnik grafitowy jest nagrzewany halogenowymi lampami podczerwieni [7].

W celu zmniejszenia efektu samodomieszkowania zmodyfikowano typowy proces epitaksji poprzez wprowadzenie dodatkowego etapu. W etapie pierwszym osadzano cienką warstwę o grubości ok. 0,4 μm , z szybkością wzrostu 0,1 $\mu\text{m}/\text{min}$, czyli prawie dziesięciokrotnie mniejszą niż w procesie standardowym, przy zachowaniu równocześnie takiego samego ciśnienia cząstkowego AsH_3 dostarczanego do reaktora, jak podczas wzrostu warstwy w etapie drugim. Zmniejszenie szybkości wzrostu ułatwia wbudowywanie się atomów As znajdujących się w laminarnej warstwie gazu nad powierzchnią płytki w wyniku trawienia podłoża w HCl i wygrzewania w wysokiej temperaturze. Bardzo powolny wzrost pozwala skutecznie związać tę domieszkę w cienkim obszarze warstwy epitaksjalnej i zapobiec dalszemu samodomieszkowaniu [5,6].

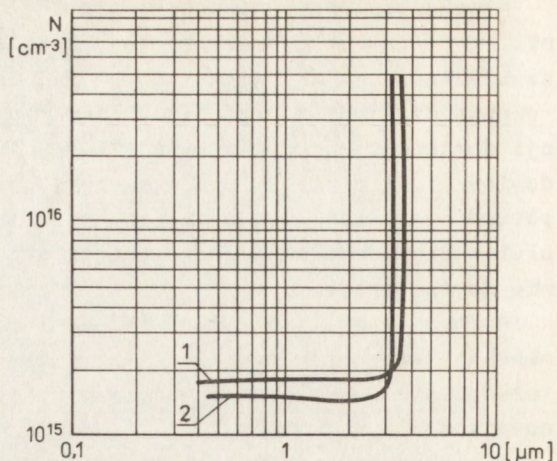
Dwuetaповy proces epitaksji przebiegał wg schematu przedstawionego na rys. 4. Otrzymane profile koncentracji domieszki wybranych płytek przedstawiono na rys. 5.

Jak wynika z otrzymanych wyników wprowadzenie dwuetaповego procesu epitaksji pozwoliło na osiągnięcie znacznie lepszego rozkładu koncentracji nośników w obszarze przejściowym warstwa epitaksjalna-podłożo.

Przedstawiony sposób wytwarzania warstw epitaksjalnych domieszkowanych As umożliwia otrzymanie gradientu zmian koncentracji nośników



Rys. 4. Schemat dwuetapowego procesu epitaksji
 a - przepływ wodoru głównego,
 b - temperatura grzejnika,
 c - przepływ HCl podczas trawienia płytek podłożowych,
 d - przepływ SiCl_4 podczas dwuetapowego wzrostu warstwy,
 t₄ - skokowa zmiana przepływu SiCl_4
 e - przepływ AsH_3 podczas wzrostu warstwy
 t₁ - włączenie układu grzania,
 t₂-t_{2'} - trawienie płytek podłożowych, t₃-t₄ - etap I wzrostu warstwy, t₄-t₅ - etap II wzrostu warstwy



Rys. 5. Profile koncentracji nośników w warstwach otrzymanych w dwuetapowym procesie epitaksji
 płytka 1 - początek grzejnika,
 płytka 2 - koniec grzejnika

w obszarze przejściowym, porównywalnego do gradientu koncentracji w warstwach domieszkowanych fosforem na podłożu domieszkowanym antymonem.

Grzejnik grafitowy przed procesem epitaksji jest pokrywany warstwą niedomieszkowanego krzemu o grubości około 5 μm . Podczas trawienia płytek podłożowych w HCl, bezpośrednio przed wzrostem epitaksyjnym, następuje przeniesienie krzemu z grzejnika na tylną stronę płytek podłożowych. Warstwa ta maskuje tylną stronę płytki i zapobiega odparowaniu As podczas epitaksji.

Kolejne operacje technologiczne procesu epitaksji, tj. trawienie płytek podłożowych gazowym HCl, płukanie reaktora po trawieniu płytek, etap I i II wzrostu epitaksyjnego były przeprowadzone w temperaturze 1438 K. Prędkości wzrostu wynosiły odpowiednio dla etapu I 0,1 $\mu\text{m}/\text{min}$ i etapu II 0,9 $\mu\text{m}/\text{min}$.

3. PARAMETRY PŁYTEK Z WARSTWĄ EPITAKSJALNĄ

Jako podłoża dla krzemowych warstw epitaksyjnych domieszkowanych As, przeznaczonych na tranzystory mikrofalowe typu npn, stosuje się płytki z monokrystalicznego krzemu typu n^+ , domieszkowanego As, o rezystywności 0,001±0,005 $\Omega \cdot \text{cm}$.

Opracowano metody otrzymywania dwóch różnych rodzajów warstw o parametrach podanych w tabeli 1 dla tranzystorów niskoszumnych i mocy.

Tabela 1. Parametry warstw epitaksjalnych dla tranzystorów mikrofalowych

Typ I	Typ II
$d = (2,2 \pm 2,8) \mu\text{m}$ $\varphi = (0,7 \pm 0,9) \Omega \cdot \text{cm}$ $N = (7,2 \pm 5,4) \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$	$d = (5 \pm 6) \mu\text{m}$ $\varphi = (2 \pm 3) \Omega \cdot \text{cm}$ $N = (2,3 \pm 1,5) \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$
d - grubość warstwy, φ - oporność warst, N - koncentracja domieszki	

3.1. Geometria płytek

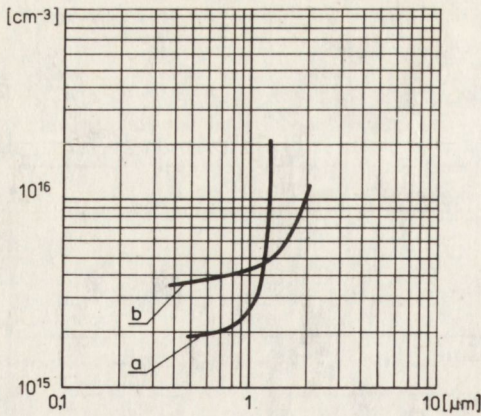
Procesy fotolitografii ze względu na małe wielkości struktur tranzystorów mikrofalowych narzucają wysokie wymagania w stosunku do geometrii płytek z warstwą. Błąd płaskorównoległości i wygięcie nie powinny przekraczać $5 \mu\text{m}$, dlatego też płytki podłożowe wymagają selekcji przed procesem epitaksji.

Przy grzaniu promieniowaniem podczerwonym płytki podłożowe są równomiernie nagrzewane - nie ma różnicy temperatur między dolną i górną powierzchnią płytki, dzięki czemu unika się naprężeń prowadzących do wygięcia płytek.

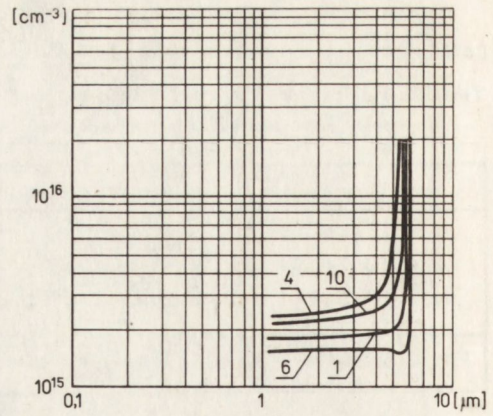
Pomiary błędów płaskorównoległości i wygięcia na płytkach z warstwami epitaksjalnymi wykazały, że błąd płaskorównoległości zwiększa się, natomiast wygięcie zmniejsza się lub pozostaje bez zmian. Ponieważ osadzone warstwy mają grubość około $5 \mu\text{m}$ /typ II/, a rozrzut grubości na płytce wynosi $\pm 0,5 \mu\text{m}$, pogorszenie płaskorównoległości wynika głównie z nierównomiernego przechodzenia krzemu z grzejnika na tylną stronę płytki podłożowej.

Potwierdzeniem tego przypuszczenia był proces epitaksji na grzejniku nie pokrytym warstwą krzemu /nie zamaskowana tylko strona płytek/. Osadzenie warstwy epitaksjalnej w takich warunkach zapewnia zachowanie płaskorównoległości, natomiast pogarsza profil koncentracji. Tylna strona płytki podczas epitaksji zachowuje się w tym przypadku jak stałe źródło atomów As, co znajduje odbicie we wzroście koncentracji nośników dla kolejnych warstw wzdłuż grzejnika oraz w rozmyciu profilu koncentracji /rys. 6/.

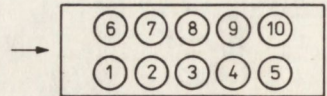
W trakcie dalszych prób ustalono, że minimalna grubość warstwy krzemu na grzejniku wynosi $2 \pm 2,5 \mu\text{m}$. Dla tej grubości warstwy maskującej nie następuje jeszcze pogorszenie płaskorównoległości, a zmiana koncentracji domieszki wzdłuż grzejnika mieści się w wymaganych dla obu typów warstw zakresach. Pokrycie grzejnika warstwą krzemu o grubości $2,5 \mu\text{m}$ dawało w efekcie rozrzut koncentracji domieszki dla skrajnych płytek /początek i koniec grzejnika $\pm 10\%$ / i pozwoliło utrzymać błąd płaskorównoległości w dopuszczalnym zakresie.



Rys. 6. Profil koncentracji nośników w obszarze przejściowym warstwa-podłoże
a - maskowana tylna strona płytki,
b - nie maskowana tylna strona płytki /warstwa częściowo strawiona do pomiaru metodą C-V/



Rys. 7. Rozrzut koncentracji nośników w warstwach otrzymanych w dwuetapowym procesie wzrostu na grzejniku pokrytym 2,5 μm warstwą krzemu



Rozrzuty koncentracji nośników wzdłuż grzejnika i otrzymane profile koncentracji dla procesów epitaksji prowadzonych dla 2,5 μm warstwy krzemu pokrywającej grzejnik przedstawiono na rys. 7.

3.2. Ocena położenia międzypowierzchni warstwa epitaksjalna-podłoże

Położenie międzypowierzchni określa się jako miejsce w obszarze przejściowym podłoże-warstwa epitaksjalna, w którym pole elektryczne osiąga maksymalną wartość. Koncentrację nośników swobodnych na międzypowierzchni oblicza się ze wzoru [8]:

$$n_{mo} = N_{DI} \exp \left(\frac{\ln \frac{N_{DI}}{N_{DII}}}{\frac{N_{DI}}{N_{DII}} - 1} - 1 \right) \quad /3/$$

gdzie: N_{DI} , N_{DII} - koncentracje nośników swobodnych domieszek odpowiednio w obszarze silniej i słabiej domieszkowanym

Punkt na doświadczalnym profilu koncentracji nośników, otrzymany np. metodą C-V, odpowiadający obliczonej ze wzoru /3/ wartości n_{mo} , określa położenie międzypowierzchni, a więc i jej odległości od powierzchni warstwy epitaksjalnej.

Wartość koncentracji na międzypowierzchni nie jest zależna od szerokości obszaru przejściowego, czyli nie zależy od gradientu koncentracji w tym obszarze.

Przy obliczaniu położenia międzypowierzchni przyjęto, że wartość koncentracji N_{DI} /obszar silnie domieszkowany/ jest równa koncentracji nośników swobodnych w płytce podłożowej. Obliczenia przeprowadzono dla płytek podłożowych o koncentracji nośników $1,08 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ i taką też wartość przyjęto dla N_{DI} . Wartości N_{DII} /obszar słabiej domieszkowany - warstwa epitaksjalna/ dla przedstawionych w tabeli 1 dwóch typów warstw mieszczą się w zakresie:

a/ I typ warstw epitaksjalnych

$$N_{DII} = N_{epi} = /5,45 \times 10^{15} - 7,16 \times 10^{15}/ \text{ cm}^{-3}$$

b/ II typ warstw epitaksjalnych

$$N_{DII} = N_{epi} = /1,53 \times 10^{15} - 2,34 \times 10^{15}/ \text{ cm}^{-3}$$

Obliczona wartość koncentracji nośników swobodnych na międzypowierzchni dla przyjętych koncentracji N_{DI} i N_{DII} była jednakowa dla obu typów warstw epitaksjalnych i wynosiła $4,0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

3.3. Profil koncentracji nośników

Dla oceny złącz l-h przyjęto w Zakładzie Epitaksji ITME metodę określania wielkości rozmycia profilu koncentracji na podstawie zmierzonych metodą C-V profili koncentracji. Pomiar koncentracji nośników w warstwie wykonano metodą C-V za pomocą testera TMP-80, przy użyciu sondy rtęciowej typu Hg 1C firmy MSI [9].

Jako miarę wielkości rozmycia profilu koncentracji domieszki w obszarze złącza n^+/n przyjęto współczynnik R wyrażony przez stosunek pola pod krzywą koncentracji domieszki $N(x)$ do pola określonego przez stałą poziom domieszki w warstwie. Sposób obliczania współczynnika R wg wzoru /4/ ilustruje rys. 8.

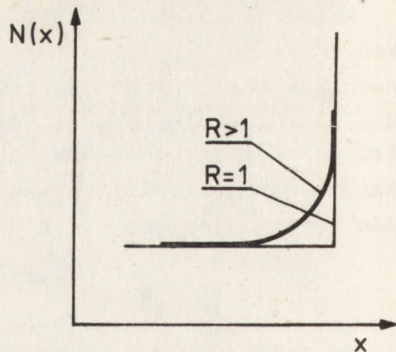
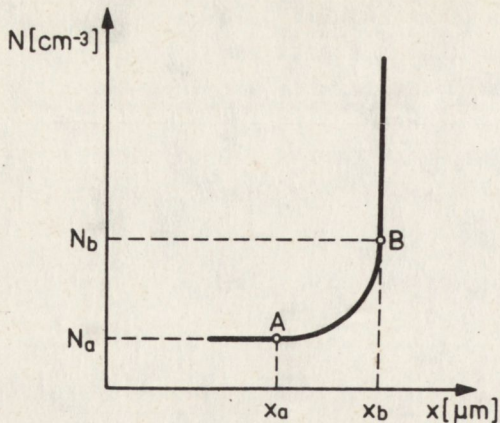
$$R = \frac{1}{N_a(x_b - x_a)} \int_{x_a}^{x_b} N(x) dx \quad /4/$$

Dla złącza skokowego $R = 1$, natomiast dla $R > 1$ występuje w obszarze przejściowym podwyższenie koncentracji nośników powyżej stałego poziomu koncentracji w warstwie /rys. 9/.

Wartość całki ze wzoru /4/ jest obliczana na podstawie wykresu $N(x)$ metodą sumowania pól pod odcinkami prostymi aproksymującymi funkcję $N(x)$.

Napisany początkowo w języku kalkulatora Texas Instruments SR 60A program obliczający wartość współczynnika R został obecnie przystosowany dla mikrokomputera Amstrad 464.

Współczynnik R umożliwił ilościowe porównanie rozkładu domieszki /stopnia rozmycia/ w obszarze przejścia podłoże-warstwa. Wartości R dla poszczególnych płytek otrzymanych w dwuetapowym procesie epitaksji, na grzejniku pokrytym $2,5 \mu\text{m}$ warstwą krzemu, zamieszczono w tabeli 2. Profile koncentracji tych warstw przedstawia rys. 7.



Rys. 8. Wyznaczanie współczynnika R
 N_a - stała koncentracja w warstwie, $N_b = 10 \times N_a$

Rys. 9. Profile koncentracji w zależności od R

Tabela 2. R w zależności od położenia płytki na grzejniku

Nr płytki	R	Położenie
1	1,072	początek grzejnika
6	1,080	
4	1,223	koniec grzejnika
10	1,218	

4. PODSUMOWANIE

Opracowano metodę dwuetapowego wzrostu warstw domieszkowanych As na silnie domieszkowanych As podłożach krzemowych. Taki sposób prowadzenia procesu epitaksji ograniczał w dużym stopniu wpływ zjawiska samodomieszkowania.

Otrzymano epitaksjalne warstwy Si domieszkowane As o parametrach właściwych dla mikrofalowych tranzystorów niskoszumnych i mocy.

Praca w formie komunikatu przedstawiona na VII Krajowej Konferencji Mikrofalowej MIKON'86 w Zakopanem 21-24.04.1986 r.

LITERATURA

- Swanson T.B., Tucker R.S., J. Electrochem. Soc., 116, /1969/, 1271.
- Iahii T., Takahashi K., Kondo A., Shinehuta K., J. Electrochem. Soc., 122, /1975/, 1523.
- Rei-Choudhury P., Salkowitz E.J., J. Cryst. Growth, 7, /1970/, 353.
- Reif R., Kannis T.I., Saraswat K.C., J. Electrochem. Soc., 125, /1978/, 1860.
- Nossarzewska-Orłowska E., Szymkiewicz A., Tomaszewski J., Lipiński D., Sarnecki J., Patent P.244741.
- Nossarzewska-Orłowska E., Tomaszewski J., Brzozowski A., Sarnecki J., Materiały Elektroniczne, 2, /1985/, 31.
- Nossarzewska-Orłowska E., Skwarcz J., Szymkiewicz A., Materiały Elektroniczne, 2, /1985/, 36.
- Kuźnicki Z.T., Patent P.122087.
- Brzozowski A., Szymkiewicz A., Materiały Elektroniczne 4, /1983/, 36.