

Pomiar warstw epitaksjalnych metodą C-V przy użyciu sondy rtęciowej

WSTĘP

Pomiar parametrów elektrycznych krzemowych warstwy epitaksjalnych jest ciągłym przedmiotem zainteresowań wszystkich producentów tych materiałów. Znajomość profilu domieszkowania warstw epitaksjalnych jest bardzo ważna dla poznania mechanizmów wzrostu krystalograficznego, kontroli parametrów tych warstw w procesie wytwarzania oraz dla konstrukcji elementów półprzewodnikowych.

Istnieje kilka metod pomiarowych rozkładu koncentracji domieszek takich jak:

- metoda "oporności rozptywu" (spreading resistance),
- metoda sondy czterostrzowej,
- SIMS (secondary ion mass spectrometer),
- metoda analizy charakterystyk pojemnościowo-napięciowych (metoda C-V).

W części pierwszej artykułu omówiono własności fizyczne złącza prostującego metal-półprzewodnik wykorzystane przy wyznaczaniu koncentracji domieszek - metoda C-V. Przedstawiono także zasadę działania układów pomiarowych i przykładowe rozwiązania sond pomiarowych z kontaktami rtęciowymi.

Część druga omawia praktyczne aspekty wykorzystania metody C-V przy kontroli parametrów warstw epitaksjalnych. Zastosowanie sondy pomiarowej z kontaktami rtęciowymi w metodzie C-V umożliwi szybkie i łatwe wyznaczenie rozkładu koncentracji domieszek.

ZASADA POMIARU KONCENTRACJI NOŚNIKÓW W WARSTWACH EPITAKSJALNYCH METODĄ C-V PRZY UŻYCIU SONDY RTĘCIOWEJ

1. TEORETYCZNE PODSTAWY POMIARU KONCENTRACJI DOMIESZEK METODĄ C-V

1.1. Własności fizyczne kontaktu metal-półprzewodnik

Własności kontaktu metal-półprzewodnik (m-p) zależą od rodzaju metalu i półprzewodnika stykających się ze sobą. W przypadku idealnego styku m-p (wyklucza się istnienie stanów powierzchniowych) praca wyjścia elektronów z metalu może być większa lub mniejsza od pracy wyjścia elektronów z półprzewodnika, tj. $A_m < A_p$ lub $A_m > A_p$. W przypadku, gdy $A_m < A_p$, jeśli metal i półprzewodnik zostaną doprowadzone do bezpośredniego kontaktu, to poziomy Fermiego obu tych materiałów staną się równe, chociaż przed oraz tuż po ich zetknięciu różniły się one o wartość równoważną napięciu wbudowanemu.

Przed ustaleniem się stanów równowagi poziomów Fermiego elektrony będą płynęły z obszaru o mniejszej pracy wyjścia do obszaru o większej pracy wyjścia tak długo, aż poziomy Fermiego wyrównają się. W rezultacie ustalenia się stanu równowagi dalszy przepływ elektronów nie będzie zachodził.

Istniejący w obszarze styku m-p rozkład ładunku przestrzennego jest taki, że praktycznie cała grubość warstwy ładunku przestrzennego mieści się po stronie półprzewodnika. Różnica między poziomami Fermiego łącznie z pasmem zabronionym wyznacza teoretycznie wysokość bariery energetycznej kontaktu m-p, ale w praktyce są obserwowane rozbieżności między teorią a praktyką na skutek obecności warstw dipolowych, powstałych z ładunków uwięzionych na powierzchni.

Pod wpływem przyłożonego z zewnątrz pola elektrycznego następuje zakłócenie równowagi. Wywołuje ono zmianę wysokości bariery energetycznej występującej na warstwie ładunku przestrzennego. Obecność bariery energetycznej powoduje, że kontakt m-p ma własności prostujące. Taki prostujący kontakt m-p jest na ogół nazywany diodą z barierą Schottky'ego. Warunkiem powstania kontaktu prostującego jest:

$$\text{lub} \quad \begin{array}{l} A_m > A_p \quad \text{dla półprzewodnika typu "n",} \\ A_m < A_p \quad \text{dla półprzewodnika typu "p".} \end{array} \quad (1)$$

Praca wyjścia elektronów z metalu jest uzależniona od stanu powierzchni; dla rtęci (Hg) wielkość ta wynosi 4,5 - 4,7 eV (rozrzut wartości wynika ze

stosowanych różnych metod pomiarowych). Praca wyjścia dla półprzewodnika jest funkcją koncentracji domieszek oraz temperatury np. dla temperatury $T = 300$ K wartość ta przedstawiona jest w tabeli 1.

T a b e l a 1

Zależność pracy wyjścia elektronów w funkcji koncentracji domieszek dla $T = 300$ K.

Wielkość bariery energetycznej (eV)	Koncentracja nośników			
	typ n		typ p	
	10^{14} [cm ⁻³]	10^{16} [cm ⁻³]	10^{14} [cm ⁻³]	10^{16} [cm ⁻³]
Si	4,32	4,20	4,82	4,94
GaAs	4,44	4,31	5,14	5,27

Jak wynika z powyższego, rtęć jest metalem dobrze spełniającym warunek (1) i dlatego może być stosowana do formowania diod z barierą Schottky'ego.

Własności złącza m-p są podobne do własności złącza n-p, można zatem mówić o polaryzacji złącza m-p w kierunku zaporowym i przewodzenia. Charakterystyka prądowo-napięciowa omawianego złącza jest nieliniowa i podobna do charakterystyki złącz p-n.

Szerokość warstwy ładunku przestrzennego zmienia się pod wpływem przyłożonego pola elektrycznego, a także jest zależna od koncentracji nośników. Szerokość warstwy ładunku przestrzennego opisuje wzór (2).

$$x_b = \left[\frac{2E_s (U_d + U)}{qN} \right]^{0,5} \quad (2)$$

gdzie:

- x_b - szerokość warstwy ładunku przestrzennego,
- E_s - przenikalność względna materiału półprzewodnikowego,
- U_d - napięcie wbudowane wynikające z istnienia bariery energetycznej,
- U - napięcie przykładane z zewnątrz,
- q - ładunek elektronu,
- N - koncentracja nośników (domieszki).

Wzór jest wyprowadzony na podstawie rozwiązania równania Poissona dla przypadku jednowymiarowego

$$\frac{d^2 U}{dx^2} = \frac{qN}{E_s}$$

przy założeniach upraszczających:

- domieszki są całkowicie zjonizowane,
- brak pola elektrycznego poza obszarem ładunku przestrzennego,
- gęstość ładunku przestrzennego jest równa gęstości zjonizowanych domieszek,

1.2. Wyznaczanie koncentracji domieszek na podstawie charakterystyk C-V

Pojemność (na jednostkę powierzchni) złącza m-p wynosi

$$C = \frac{E_s A}{x} \quad (3)$$

gdzie:

- C - pojemność złącza m-p,
- A - pole powierzchni złącza m-p,
- x - szerokość ładunku przestrzennego.

Podstawiając (2) do (3) otrzymujemy:

$$C = A \left[\frac{q E_s N}{2(U_d + U)} \right]^{0,5} \quad (4)$$

Różniczkując (4) względem napięcia U i przedstawiając koncentrację N jako funkcję pojemności C, otrzymujemy:

$$N = \frac{C^3}{q E_s A^2} \left(\frac{dC}{dU} \right)^{-1} \quad (5)$$

Przekształcając wzór (3) otrzymujemy:

$$x = \frac{E_s A}{C} \quad (6)$$

Mierząc charakterystykę pojemnościowo-napięciową wstecznie spolaryzowanego złącza m-p tj. rtęć-warstwa epitaksjalna (Si, GaAs, GaAs_{1-x}P_x, GaP) można na podstawie wzorów (5) i (6) wyznaczyć rozkład domieszki w funkcji głębokości, czyli wyznaczyć funkcję N(X).

1.3. Wpływ pojemności pasożytniczej na wyznaczany rozkład koncentracji domieszki

Mierząc pojemność C złącza m-p w określonym układzie elektrycznym, należy liczyć się z wpływem pojemności pasożytniczych. Do pojemności pasożytniczych zalicza się pojemność doprowadzeń oraz pojemność wynikającą z efektu brzegowego [3].

Pojemność doprowadzeń i pojemności montażowe sondy pomiarowej są wielkościami stałymi charakterystycznymi dla danego układu pomiarowego

i łatwo je wyeliminować.

Układ elektroniczny mierzący pojemność, wytwarza na wyjściu napięcie stałe, proporcjonalne do mierzonej pojemności. Kompensacja pojemności pasożytniczych występujących przy pomiarze pojemności złącza m-p polega na sumowaniu napięcia odpowiadającego mierzonej pojemności z napięciem o przeciwnej polaryzacji podawanym z regulowanego źródła napięciowego. Regulowana wartość napięcia "kompensowanego" odpowiada wartości pojemności pasożytniczych.

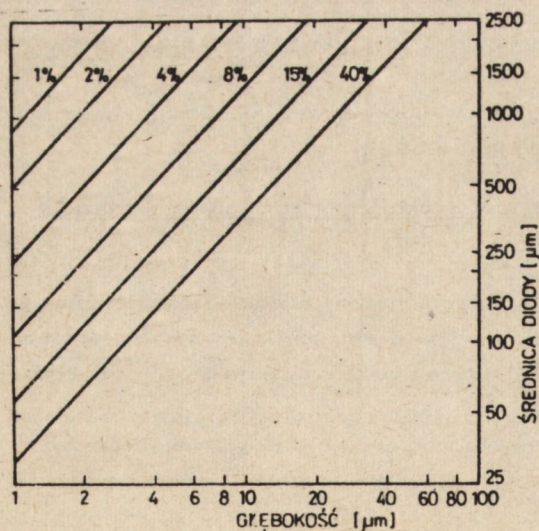
Pojemność wynikającą z efektu brzegowego szeroko omówiono w pracy [3]. Wykazano, że mierzoną pojemność C można opisać wzorem

$$C = C_1 \left(1 + \frac{bx}{r} \right)$$

gdzie:

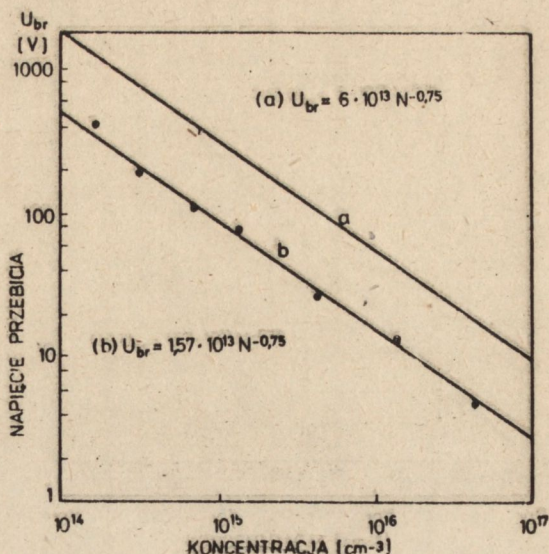
- C - pojemność mierzona,
- C_1 - pojemność złącza m-p,
- b - współczynnik wyznaczony eksperymentalnie, wynoszący dla Si i GaAs 1,5,
- x - szerokość ładunku przestrzennego,
- r - promień kontaktu złącza m-p.

Wpływ pojemności wynikających z efektu brzegowego jest istotny dla małych średnic złącza (mniejszych niż $300 \mu\text{m}$) oraz dla koncentracji domieszek mniejszych niż 10^{15}cm^{-3} . Błąd względny pomiaru koncentracji wynikający z nieskompensowania pojemności "brzegowej", będący funkcją głębokości wnikania ładunku przestrzennego oraz średnicy złącza Hg-półprzewodnik, przedstawiono na rys. 1. Niskie napięcie przebicia V_b złącza m-p jest tłumaczone jako skutek występowania efektu brzegowego (rys. 2).

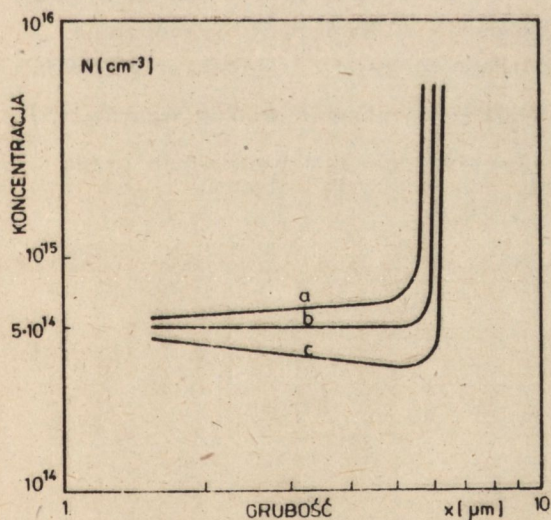


Rys. 1. Błąd pomiaru koncentracji wynikający z efektu "brzegowego"

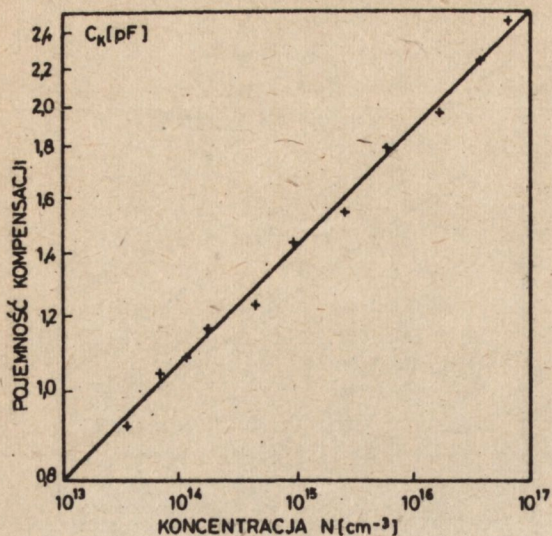
Rys. 2. Zależność napięcia przebicia V_{br} (a - zależność teoretyczna, b - zależność eksperymentalna) złącza m-p w funkcji koncentracji domieszek w warstwie epitaksjalnej



Nieskompensowanie pojemności pasożytniczych jest przyczyną błędnego wyznaczenia rozkładu domieszki w funkcji głębokości. Jeżeli wiadomo, że rozkład domieszki jest jednorodny w warstwie epitaksjalnej, to w łatwy sposób można wyeliminować wpływ pojemności pasożytniczych, ustalając wartość kompensacji tak, aby uzyskany profil koncentracji domieszki był stały (rys. 3). Postępując w ten sam sposób przy pomiarze warstw epitaksjalnych o różnych poziomach koncentracji domieszki wyznaczono krzywą wartości kompensacji w funkcji koncentracji domieszek (rys. 4).



Rys. 3. Wynik pomiaru koncentracji nośników w warstwie epitaksjalnej jednorodnie domieszkowanej w warunkach:
 a - zbyt małej kompensacji pojemności pasożytniczych,
 b - pomiar prawidłowy,
 c - zbyt dużej kompensacji - przekompensowanie

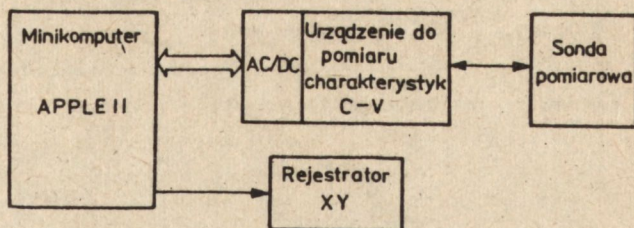


Rys. 4. Eksperymentalna zależność kompensacji pojemności pasywnych w funkcji koncentracji domieszek w warstwie epitaksjalnej

2. BUDOWA URZĄDZENIA POMIAROWEGO

Elektroniczne urządzenia przetwarzające mierzone charakterystyki C-V można podzielić na dwie grupy: urządzenia z przetwarzaniem cyfrowym oraz analogowym. Schemat blokowy urządzenia pomiarowego z przetwarzaniem cyfrowym firmy EG & Princeton Applied Research (typ 410/4108) przedstawiono na rys. 5. W zestawie tym mikrokomputer steruje według zadanego programu urządzeniem do pomiaru charakterystyk C-V, ustalając warunki pomiaru badanej warstwy epitaksjalnej. Informacje o wartościach dyskretnych pojemności C_i dla określonych wartości napięcia V_i są poddawane przetwarzaniu w mikrokomputerze, w którym jest obliczana pochodna dC/dV metodą wyznaczania stosunku przyrostu pojemności do odpowiadającego mu przyrostu napięcia tj. $\frac{C_i - C_{i-1}}{V_i - V_{i-1}}$. Następnie mikrokomputer wykonuje obliczenia według wzorów (5) i (6), a wyliczona wartość koncentracji i położenia jest wykreślana przez rejestrator XY.

Rys. 5. Schemat urządzenia pomiarowego z przetwarzaniem cyfrowym do wyznaczenia rozkładu koncentracji metodą C-V



W urządzeniach z przetwarzaniem analogowym konstrukcja przelicznika analogowego jest oparta na zlogarytmowanej postaci wzorów (5) i (6), tj.

$$\ln N = 3 \ln C + \ln \Delta V - \ln \Delta C - k_N \quad (7)$$

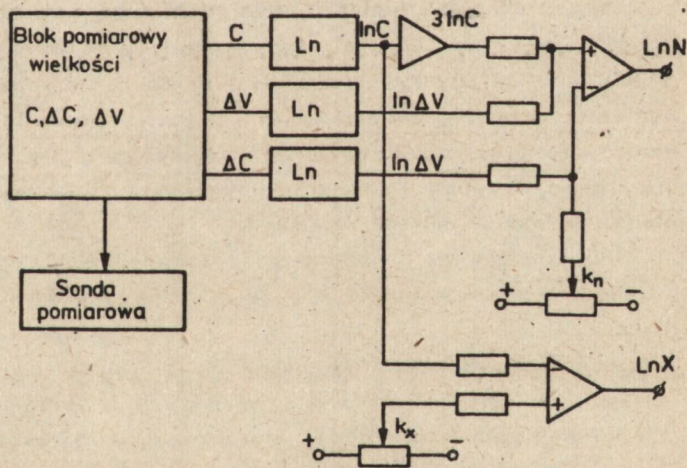
gdzie:

$$k_N = q E_s A^2$$

$$\ln x = -\ln C + k_x$$

$$k_x = E_s A$$

Uproszczony schemat urządzenia pomiarowego firmy MSI Electronics Inc (model 894-1) z przelicznikiem analogowym przedstawiono na rys. 6.

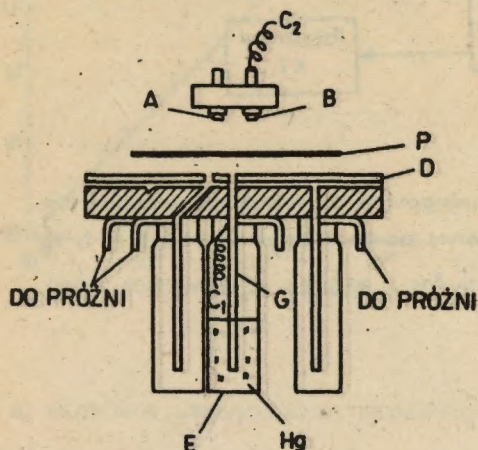


Rys. 6. Schemat blokowy urządzenia pomiarowego z przetwarzaniem analogowym do wyznaczenia rozkładu koncentracji metodą C-V

W układzie przelicznika stosuje się bardzo dokładne wzmacniacze logarytmujące, operacyjne, co zapewnia dużą dokładność przetwarzania sygnału.

3. KONSTRUKCJA SOND POMIAROWYCH

Sonda pomiarowa powinna zapewnić łatwe i szybko uformowanie stabilnego złącza prostującego. Rysunek 7 przedstawia uproszczoną konstrukcję sondy rtęciowej firmy MSI do pomiaru rozkładu koncentracji domieszek w warstwie epitaksjalnej tworzącej z podłożem złącze typu l-h.



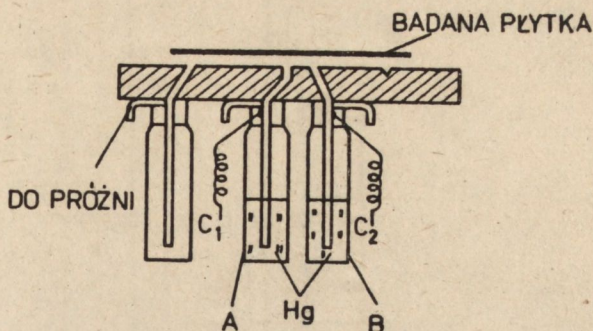
Rys. 7. Konstrukcja sondy pomiarowej do badania płytek półprzewodnikowych ze złączem l-h
A, B - bolce tworzące kontaktomowy, P - badana płytka, D - wymienna folia, G - metalowa rurka zanurzona w rtęci, E - zbiornik z rtęcią, C₁, C₂ - przewody łączące sondę z urządzeniem pomiarowym

Zasysana przez próżnię rtęć ze zbiorniczka E wypływa przez metalową rurkę G i otworek w folii D. Dociera do powierzchni płytki P tworząc kontakt prostujący. Od góry badaną płytkę dociskają dwa bolce tworzące kontakt omowy. Przewody C₁ i C₂ łączące sondę z urządzeniem pomiarowym są podłączone do metalowej rurki G i bolca B. Aby zapewnić niską oporność kontaktu omowego, do bolców A i B jest doprowadzone impulsowo napięcie stałe o amplitudzie około 150 V i zmieniającej się biegunowości. Napięcie to przebija wszystkie samorzutnie powstające cienki na biernej stronie płytki i obniża oporność złącza omowego.

Średnica złącza prostującego zależy od średnicy otworka w folii D. Aby zmienić średnicę kontaktu m-p, wystarczy założyć folię o wymaganej średnicy otworka.

Do pomiaru koncentracji domieszki w warstwach epitaksjalnych nanoszących na izolujące podłoża lub tworzących z podłożem złącze typu p-n, stosuje się sondę pomiarową o nieco innej konstrukcji (rys. 8). Zasysana przez próżnię rtęć wypływa jednocześnie z dwóch zbiorników A i B i przez metalowe rurki dociera do powierzchni badanej warstwy epitaksjalnej, tworząc dwa złącza z barierą Schottky'ego. Jedno ze złącza zawsze jest spolaryzowane w kierunku zaporowym, a drugie w kierunku przewodzenia. Przewody łączące sondę z urządzeniem pomiarowym są dołączone do metalowych rurek zanurzonych w zbiorniczkach z rtęcią.

Pomiar rozkładu koncentracji domieszki przy użyciu sondy z dwoma kontaktami rtęciowymi jest mało dokładny, gdyż w obwód pomiarowy jest włączona szeregowo oporność warstwy epitaksjalnej.



Rys. 8. Konstrukcja sondy pomiarowej z dwoma kontaktami rtęciowymi do badania warstw epitaksjalnych tworzących z podłożem złącze typu p-n. A, B - zbiorniki z rtęcią, C1, C2 - przewody łączące sondę z urządzeniem pomiarowym

4. DOKŁADNOŚĆ METODY POMIAROWEJ

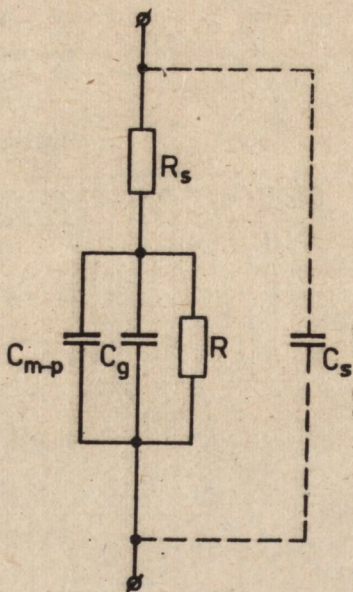
Dokładność wyznaczania profilu koncentracji domieszek w warstwie epitaksjalnej metodą pomiaru charakterystyki C-V przy użyciu sondy rtęciowej zależy od dokładności wyznaczania wartości wielkości występujących we wzorach (5) i (6), tj. pojemności C, pola powierzchni złącza m-p, pochodnej dC/dV oraz dokładności skompensowania pojemności pasożytniczych.

Na dokładność pomiarów ma także wpływ jakość złącza z barierą Schottky'ego. Warunkiem dokładnych pomiarów jest stabilna charakterystyka prądowo-napięciowa, nie wykazująca ujemnych nachyleń, o możliwie dużym nachyleniu w kierunku przewodzenia (oporność szeregową złącza rzędu kilkunastu omów). Jest także wymagane, aby prąd w kierunku zaporowym, aż do napięcia przebicia lawinowego, był mały (mniejszy niż $100 \mu A$). Z wymienionych powodów przed pomiarem rozkładu koncentracji należy kontrolować charakterystykę I-U na charakterografie.

Zastępczy schemat elektryczny wstecznie spolaryzowanego złącza m-p przedstawiono na rys. 9.

Oporność szeregową złącza omowego oraz złącza prostującego jest przedstawiona jako rezystancja R_s . Jeżeli opór szeregowy R_s jest zbyt duży, to pomiar pojemności złącza m-p jest obciążony dużym błędem. Zmniejszenie oporu złącza omowego, stanowiącego część oporu R_s , jest realizowane dzięki zastosowaniu wyładowania elektrycznego między doprowadzeniami metalowymi a płytką podłożową (rys. 7).

Straty kondensatora C_{m-p} przedstawia opór R. Określa on wielkość wstecznego prądu złącza m-p, który zależy od jakości powierzchni badanej warstwy epitaksjalnej. Wartość oporności R powinna być znacznie mniejsza niż wartość



Rys. 9. Zastępczy schemat elektryczny wstecznie spolaryzowanej diody m-p

reaktancji $X_{C_{m-p}}$ mierzonej pojemności C_{m-p} .

Pojemności rozproszone, składające się z pojemności kabla i gniazd połączeniowych między sondą a urządzeniem pomiarowym, przedstawiono jako pojemność C_s . Pojemność wynikająca z efektu brzegowego przedstawiono jako C_g . Pojemności C_s i C_g należy skompensować.

Podsumowując, dokładność wyznaczania koncentracji domieszek w warstwach epitaksjalnych metodą pomiaru charakterystyki C-V przy użyciu sondy rtęciowej zawiera się w granicach $\pm 20\%$, a dokładność wyznaczenia położenia wynosi około 10%.

C z ę ś ć 2

POMIAR WARSTW EPITAKSJALNYCH METODĄ C-V PRZY UŻYCIU SONDY RTĘCIOWEJ

1. METODY KONTROLI PROCESÓW EPITAKSJI

Znajomość parametrów elektrycznych krzemowych warstw epitaksjalnych jest niezbędna do uzyskania powtarzalnych parametrów procesów epitaksji.

Kontrolę procesów epitaksji prowadzi się obecnie trzema metodami.

Są to:

- a. Kontrola rezystywności sondą czterostrzową na płytkach kontrolnych przeciwnego typu [7].
- b. Bezpośrednia kontrola rozkładu koncentracji metodą C-V [8, 9].
- c. Kontrola wielowarstwowych struktur epitaksjalnych metodą "oporności rozptywu".

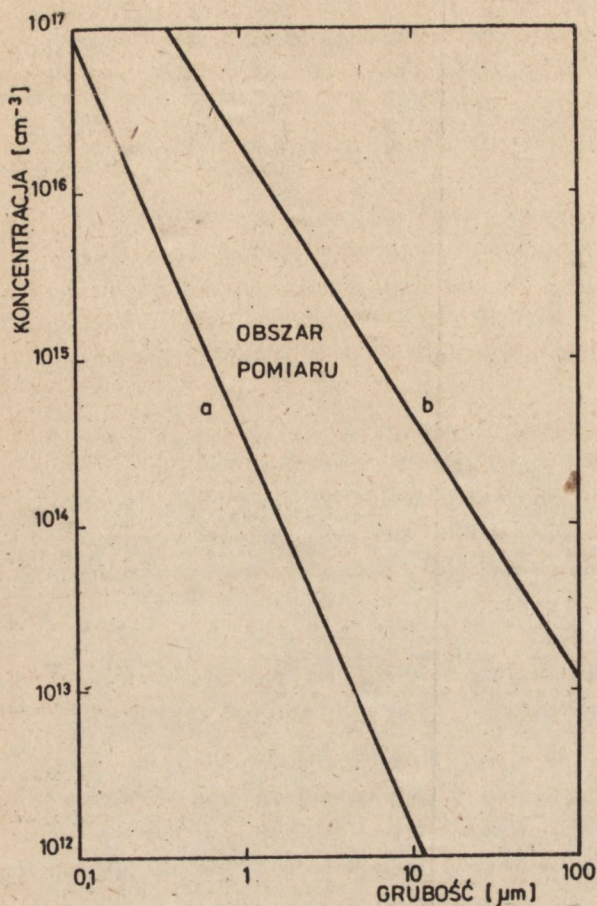
Wraz z ulepszeniem metody C-V przez wprowadzenie sondy rtęciowej metoda kontroli rozkładu koncentracji stała się bardzo prosta i szybka. Metoda ta nie wymaga wprowadzenia do reaktora testujących płytek kontrolnych przeciwnego typu; pomiaru dokonuje się bezpośrednio na wyprodukowanych płytkach, a jego wynikiem jest profil koncentracji w funkcji głębokości w warstwie.

Postępowanie się przy ocenie warstwy epitaksjalnej pojęciem koncentracji nośników jest zalecane przez takie firmy jak np. Wacker-Chemitronic [10]. Przeliczenie rozkładu koncentracji na rezystywność (i odwrotnie) na podstawie krzywych Irvina [11] jest niepotrzebne. Dla dzisiejszych wymagań krzywe Irvina są niedokładne i niepewne [12], dlatego powinno się używać pojęcia koncentracji a nie rezystywności.

2. MOŻLIWOŚCI POMIAROWE KRZEMOWYCH WARSTW EPITAKSJALNYCH PRZY UŻYCIU SONDY RTĘCIOWEJ

Metoda C-V z sondą rtęciową jak każda z metod pomiarowych ma swoje zalety i wady. Pomiar tą metodą jest szybki i nieskomplikowany. Produkowane testery zapewniają otrzymanie wykresu koncentracji nośników w funkcji grubości warstwy, a zatem wyniki nie wymagają dodatkowej obróbki matematycznej. Za pomocą tej metody można mierzyć koncentrację nośników w warstwie w bardzo dużym zakresie - od 10^{12} do 10^{18} cm^{-3} .

W warstwach o małej koncentracji, ze względu na duży obszar wnikania ładunku przestrzennego, pomiar koncentracji odbywa się na dużym odcinku w głąb warstwy. Przykładowo dla koncentracji $n = 10^{13}$ cm^{-3} pomiar zaczyna się na głębokości 10 μm i rozciąga się do 150 μm . Wielkość obszaru w jakim można badać koncentrację nośników w zależności od poziomu koncentracji przedstawiono na rys. 10.



Rys. 10. Obszar pomiaru koncentracji nośników metodą C-V

Metoda C-V nie pozwala na określenie rozkładu koncentracji nośników w warstwie epitaksjalnej poniżej głębokości przedstawionej na rys. 10 prostą a. Wynika to z faktu, że już przy polaryzacji zerowej złącza utworzonego przez rtęć ładunek przestrzenny wnika na pewną głębokość, a przy małych napięciach polaryzujących, występują niestabilności pomiarowe spowodowane efektami kontaktowymi sondy rtęciowej z warstwą epitaksjalną.

Pomiar koncentracji na dużej głębokości (prosta b na rys. 10) jest też ograniczony napięciem polaryzującym złącze z barierą Schottky'ego. Przy dużych napięciach następuje uszkodzenie utworzonego złącza. Napięcie to jest zależne od koncentracji nośników w materiale i jest duże dla niskodopowanego krzemu. Zaletą metody C-V jest to, że dla niektórych wyrobów można mierzyć

bezpośrednio i kontrolować gradient koncentracji na granicy podłoża - warstwa epitaksjalna. Warstwy grube, dla których złącze leży na głębokości większej niż przedstawiono na rys. 10, trzeba w tym celu strawić.

Autorzy pracy stosują do trawienia płytek krzemowych mieszkankę HF i HNO₃ w stosunku 1 do 8. Mieszkanka o tym składzie trawi krzem szybko, a na powstałej powierzchni łatwo jest utworzyć dobry kontakt z rtęcią.

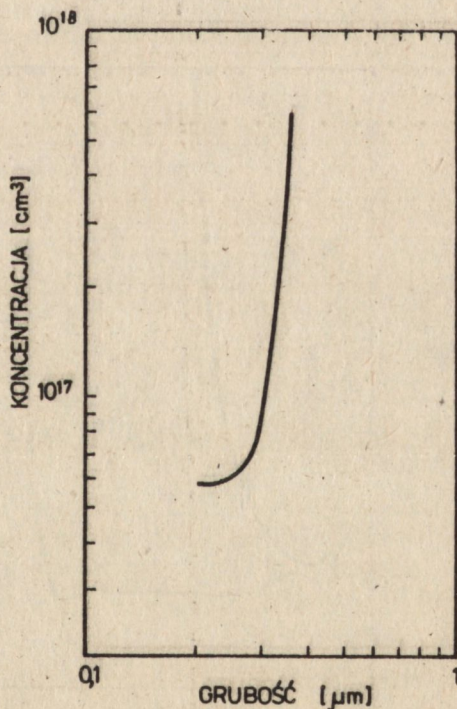
Wadą metody jest fakt, że metodą tą nie można otrzymać całego rozkładu koncentracji w warstwie, a więc nie można kontrolować profilu w pobliżu niskorezystywnego podłoża. W tym wypadku metoda oporności rozptywu w styku punktowym uzupełnia metodę C-V.

3. POMIAR WARSTW EPITAKSJALNYCH O PARAMETRACH EKSTREMALNYCH

Znajomość rozkładu koncentracji staje się szczególnie istotna w przypadku cienkich warstw epitaksjalnych o grubości poniżej $1 \mu\text{m}$. Materiały te są produkowane z przeznaczeniem na diody z barierą Schottky'ego służące do pracy w układach mikrofalowych w paśmie S i X. Mają one koncentrację domieszki w granicach od 6×10^{15} do $8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Wysokie wymagania dotyczące tolerancji grubości i rezystywności warstwy oraz wymaganie dużego gradientu koncentracji domieszki na granicy warstwa - podłoże powodują, że pomiary takich warstw muszą być bardzo precyzyjne. Praktycznie rezystywność i grubość takiego materiału można wyznaczyć tylko metodą C-V.

Pomiar rezystywności metodą czterostrzową na płytkach kontrolnych wprowadzonych do procesu jest niemożliwy, gdyż igły przebijają tak cienkie warstwy. Pomiar tak małych grubości metodą błędów wzrostu jest bardzo niedokładny. Nie można też jej zmierzyć za pomocą spektrofotometru pracującego w zakresie podczerwieni.

Ze względu na to, że dla tych koncentracji obszar pomiaru profilu domieszki jest bardzo mały, jest wymagane do pomiaru C-V bardzo dobrej jakości złącze z barierą Schottky'ego. Złącze takie można stosunkowo szybko otrzymać stosując sondę rtęciową. Przykładowy profil koncentracji takiego materiału przedstawiono na rys. 11.

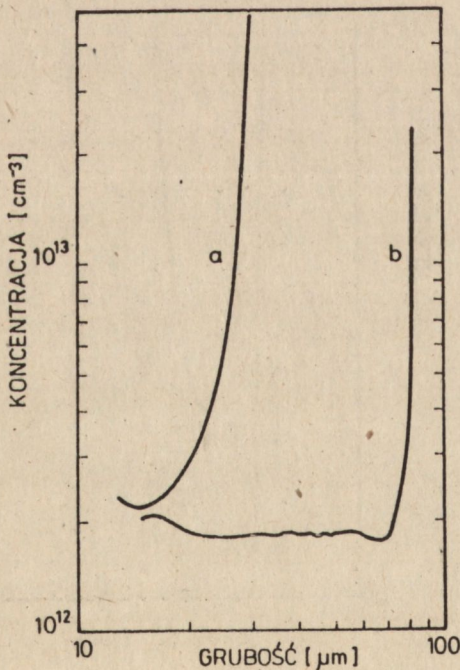


Rys. 11. Rozkład koncentracji nośników w głąb warstwy epitaksjalnej domieszkowanej fosforem osadzonej na podłożu domieszkowanym arsenem

Osobną grupę tworzą warstwy epitaksjalne o bardzo małej koncentracji (poniżej 10^{13} cm^{-3}) i grubości powyżej $20 \mu\text{m}$. Warstwy takie są przeznaczone na diody P-I-N. Wykonuje się je nanosząc w procesie epitaksji specjalnie oczyszczony SiCl_4 lub stosując tzw. epitaksję odwrotną. W drugim przypadku w procesie epitaksji na wysokorezystywnym podłożu narasta silnie domieszkowana gruba warstwa służąca jako nośnik mechaniczny materiału wysokorezystywnego, którego nadmiar usuwa się do momentu osiągnięcia żądanej grubości. Przy pomiarach tego typu warstw jest istotne dokładne skompensowanie wszystkich pasożytniczych pojemności układu pomiarowego. Jest to bardzo ważne, gdyż wartości tych pojemności są tylko o jeden rząd wielkości mniejsze, niż pojemności diody utworzonej na takim materiale.

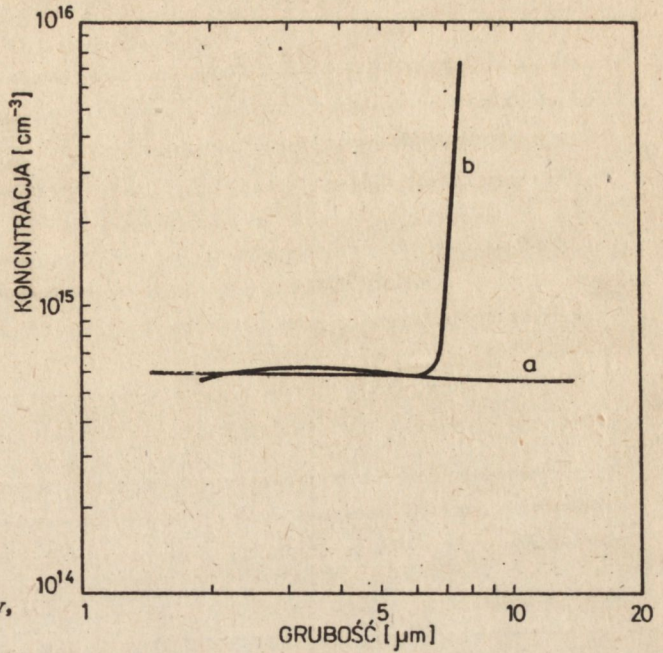
Niedokładne skompensowanie układu może spowodować duży błąd pomiarowy. Przy grubościach powyżej $50 \mu\text{m}$ i koncentracji poniżej $4 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ oporność szeregową złącza jest duża i może fałszować profil koncentracji. Na rys. 12 przedstawiono profil omawianych warstw.

Pomiar sondą rtęciową warstw epitaksjalnych o koncentracji pośredniej niż omówione nie nastęrcza większych trudności. W przypadku, gdy warstwa jest za gruba i nie udaje się zmierzyć pełnego profilu domieszki, stosuje się omówione trawienie, a grubość strawionej warstwy wyznacza się mierząc za pomocą spektrofotometru podczerwieni grubość warstwy przed i po trawieniu. Na rys. 13 przedstawiono profile przed i po trawieniu płytki.



Rys. 12. Profil koncentracji nośników warstw epitaksjalnych otrzymanych:

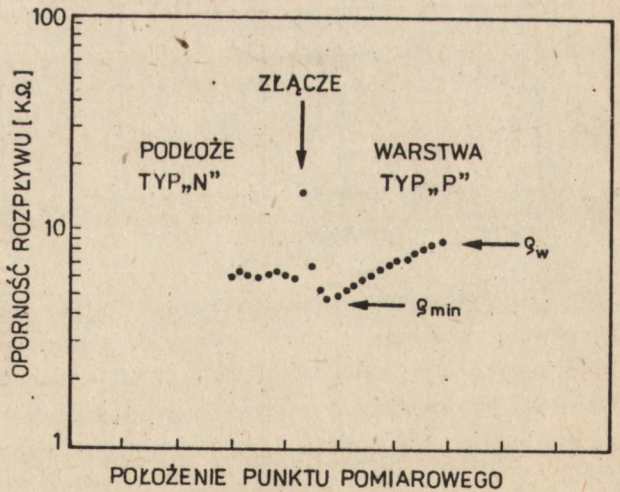
- a) w procesie epitaksji z bardzo czystym czterochlorkiem krzemu,
- b) w procesie epitaksji odwrotnej



Rys. 13. Profil koncentracji:
 a) przed strawieniem warstwy,
 b) po strawieniu warstwy

4. POMIAR WARSTW EPITAKSJALNYCH NA PODŁOŻACH SILNIE DOMIESZKUJĄCYCH

Metoda C-V ma istotne znaczenie przy kontroli warstw epitaksjalnych narastających na podłożach silnie domieszkujących, zawierających np. bor lub arsen. W początkowym etapie narastania warstwy, na płytce kontrolnej przeciwnego typu, obok domieszki wprowadzanej celowo do komory reakcyjnej wbudowuje się do warstwy domieszkę pochodzącą z wysoko zadomiesz-



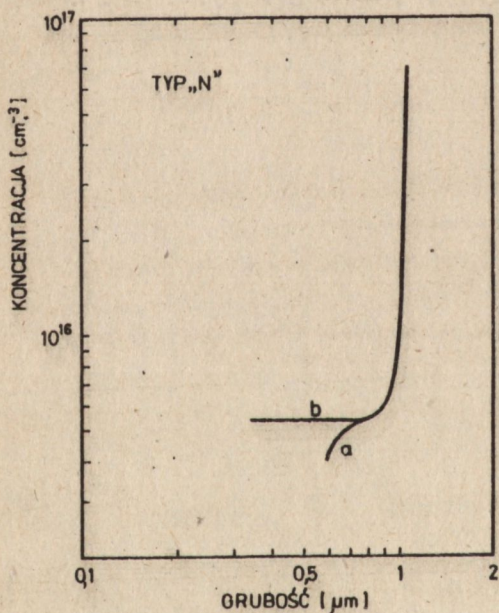
Rys. 14. Rozkład "Rezystancji rozplywu" dla złącza p/n. Kontrolka typu "n" jest domieszkowana borem z płytki podstawowej typu "p" leżącej obok

kowanego podłoża. Efektem tego jest lokalny wzrost koncentracji, a więc spadek rezystywności przy złączu. Na rys. 14 przedstawiono przykładowy rozkład rezystancji rozplywu dla takiego złącza.

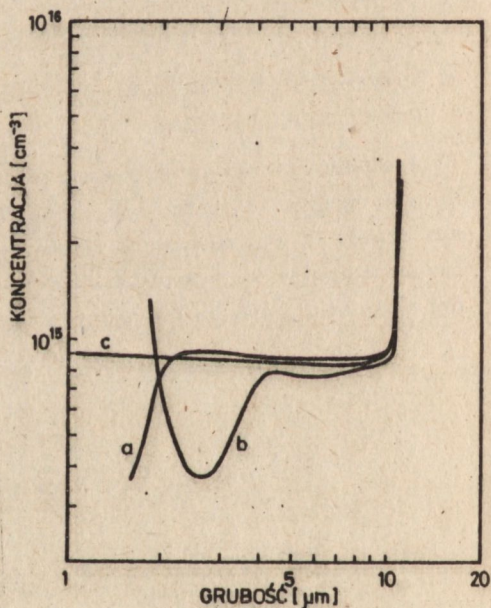
Pomiar rezystywności metodą czterostrzową na takiej płytce przy zbyt dużym prądzie powoduje uśrednienie wyniku z całego obszaru typu "p", a więc powoduje zaniżenie wyników pomiarowych. Z przedstawionego powodu wynik pomiaru sondą czterostrzową na płytce kontrolnej nie będzie poprawnie odzwierciedlał rezystywności płytek podstawowych w procesie. Pomiar koncentracji metodą C-V na płytkach podstawowych z procesu daje natomiast rzeczywisty poziom zdomieszkowania produkowanych warstw epitaksjalnych.

5. PRZYGOTOWANIE POWIERZCHNI PŁYTEK KRZEMOWYCH Z WARSTWĄ EPITAKSJALNĄ DO POMIARU

Bariera rtęć-krzem tworząca złącze prostujące jest bardzo czuła na stan powierzchni warstwy epitaksjalnej. Odpowiednie jej formowanie poprawia charakterystykę dla polaryzacji zaporowej złącza. Formowanie kontaktu omoowego od strony biernej płytki poprawia charakterystykę złącza dla polaryzacji



Rys. 15. Wpływ obróbki powierzchni na pomiar rozkładu koncentracji nośników:
a) stara powierzchnia,
b/ odświeżona powierzchnia

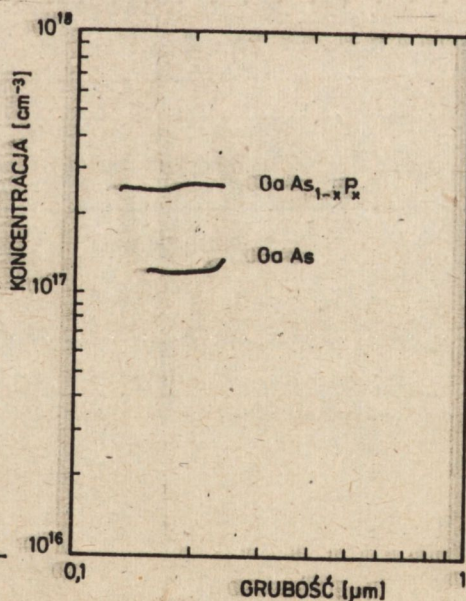


Rys. 16. Wpływ obróbki powierzchni na pomiar rozkładu koncentracji nośników:
a) stara powierzchnia
b) powierzchnia myta w HF,
c) powierzchnia myta w HF i wygrzewana

przewodzenia. Pomiar profili koncentracji domieszki w warstwie na płytce wykazującej złą charakterystykę I (U) jest nieprawidłowy. Formowanie kontaktu omowego realizuje się przez wielokrotne rozładowanie kondensatorów między elektrodami tworzącymi ten kontakt. Formowanie kontaktu rtęć-krzem dla "świeżych" warstw typu "p" nie stwarza żadnych problemów. Dla "świeżych" warstw typu "n" kontakt należy formować przez wielokrotne tworzenie złącza metodą kolejnego „podnoszenia” i „opuszczania” rtęci. Zabieg taki powtarza się do momentu uzyskania prawidłowej charakterystyki złącza. W przypadku uzyskania złych charakterystyk I (U) na płytkach mierzonych bezpośrednio po procesie epitaksji, pomiar należy powtórzyć po 1 - 2 dniach. W przypadku, gdy jest konieczny szybki pomiar, firma MSI zaleca gotowanie płytek w 50% roztworze następującej mieszaniny: 210 ml H₂O, 40 ml 30% HF i 30 ml HCl. Płytki gotuje się przez 10 - 15 min, a następnie płucze wodą dejonizowaną. Przeprowadzone próby potwierdzają podaną recepturę z tym, że jest ona dosyć kłopotliwa. Prostszy zabieg jest wygrzewanie płytek typu "n" przez 5 minut w temperaturze około 400°C.

Osobnym zagadnieniem jest pomiar płytek, na których warstwa epitaksjalna była naniesiona rok lub więcej lat przed pomiarem. Dla obu typów przewodnictwa płytki myje się w 40% roztworze HF, a następnie wygrzewa. Wynik takiej procedury przedstawiono na rys. 15 i 16.

Po zastosowaniu takiej procedury autorzy pracy otrzymali powtarzalność wyników pomiarowych w odstępach 1 roku z dokładnością $\pm 5\%$.

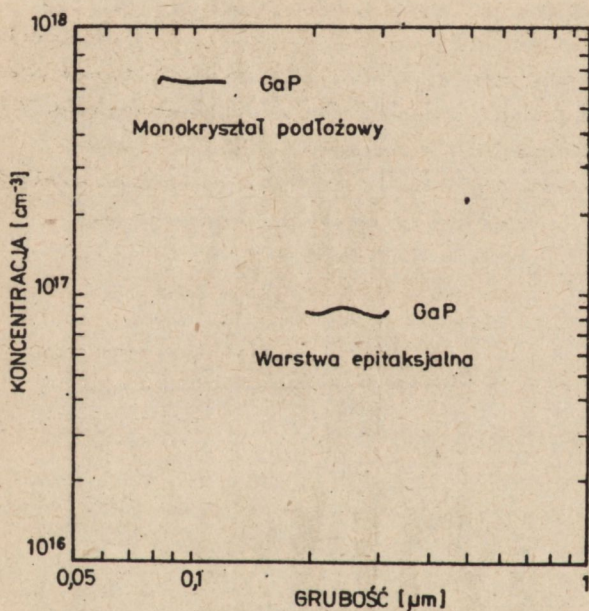


Rys. 17. Pomiar koncentracji nośników w warstwie GaAs_{1-x}P_x osadzonej na podłożu GaAs domieszko- wanej tellurem

6. POMIAR KONCENTRACJI NA $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$, GaP I GaAs

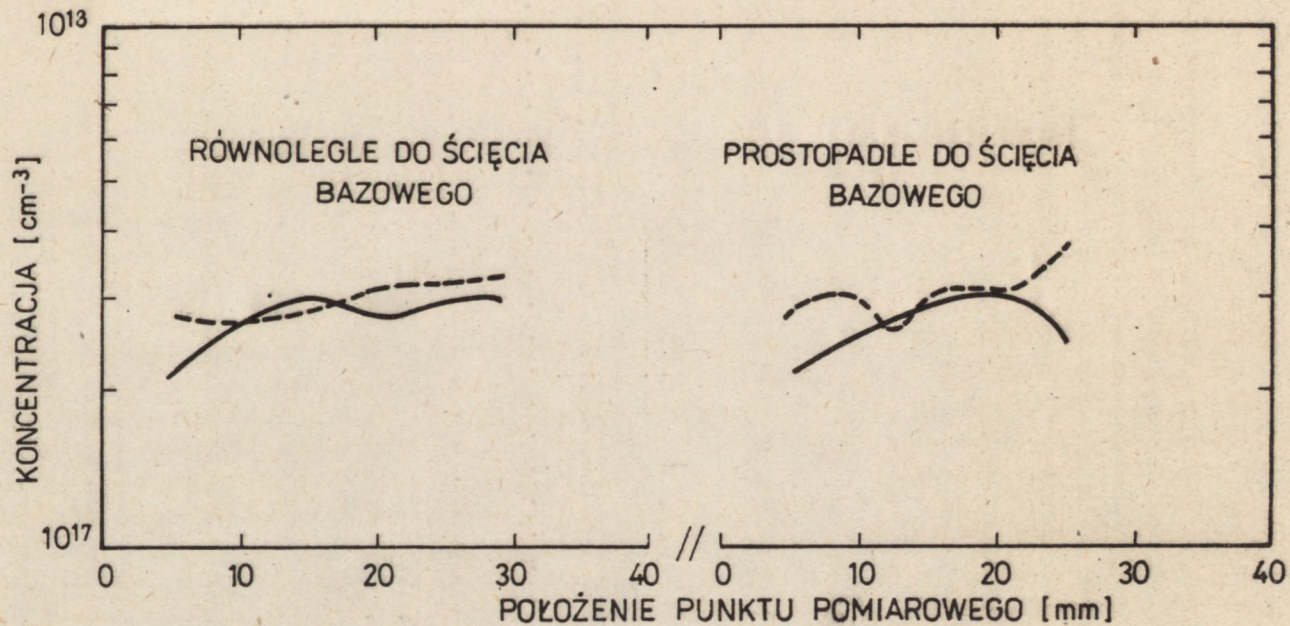
Prawidłowy kontakt rtęć-półprzewodnik można utworzyć na takich materiałach jak: GaP, GaAs i $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$. Złącza z barierą Schottky'ego utworzone na tych materiałach mają dobrą charakterystykę dla polaryzacji zaporowej. Za pomocą rozładowania kondensatorów otrzymuje się małą oporność kontaktu omowego.

Charakterystyki $I(U)$ dla takich złączy są tej samej jakości, jaką otrzymuje się dla krzemu. Umożliwia to szybkie wyznaczenie rozkładu koncentracji nośników. Ze względu na wysoką koncentrację nośników w tych materiałach i małe napięcie przebicia obszar pomiaru znajduje się blisko powierzchni warstwy i rozciąga się na niewielkim odcinku. Przykładowe wyniki takich pomiarów przedstawiono na rys. 17 i 18.



Rys. 18. Pomiar koncentracji nośników w warstwie epitaksjalnej GaP domieszkowanej siarką

Na rys. 19 przedstawiono porównanie pomiarów koncentracji nośników w $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ mierzonych metodą C-V za pomocą sondy rtęciowej z wynikami otrzymanymi metodą napięcia przebicia.



Rys. 19. Radialne rozkłady koncentracji nośników otrzymane metodą C-V z sondą rtęciową i metodą napięcia przebicia

7. PODSUMOWANIE

Pomiar koncentracji nośników metodą C-V z sondą rtęciową jest szybki i nie wymaga żadnej dodatkowej obróbki matematycznej. Pozwala to na zastosowanie metody do bieżącej kontroli procesów epitaksji krzemu oraz GaAs_{1-x}P_x i GaP.

Metodą tą można wyznaczać nie tylko wartość koncentracji nośników, ale i jej rozkład w głąb mierzonej warstwy. Kontrolę procesów epitaksjalnych można prowadzić na podstawie pomiarów parametrów elektrycznych płytek podstawowych z procesu. Eliminuje to stosowanie płytek kontrolnych i pozwala na zwiększenie jakości produkowanego materiału półprzewodnikowego.

(Tekst dostarczono 28.10.1983 r.)

LITERATURA

1. Streetman B. G: Przyrządy półprzewodnikowe , WNT, 1976
2. Wolf F.: Półprzewodniki, WNT, 1975
3. Copeland A.: Diode Edge Effect on Doping-Profile Measurements, IEEE Transactions on Electron Devices, vol. ED-17, No. 5, May 1970
4. Serevin P. J., Poodt G. J.: Capacitance - voltage measurements with a mercury diode J. Electrochem. Soc., 10, 1972
5. Binet M.: Fast and nondestructive method of C-V profiling of thin semiconductor layers on insulating substrate, Electronics Letters, 11, 580 (1975)
6. Huang R. S., Ladrooke P. H.: The use of a four - point probe for profiling sub-microlayers, Solid State Electronics, vol. 21, pp 1123-1128, 04.1978
7. ASTM Standard F374-74
8. German Standard DIN 50 439
9. ASTM Tentative F 419-77T
10. Technical Information Wacker-Chemitronic, 1979
11. Irvin J. C.: Bell System Technical Journal, 41 (1962), s. 387-410
12. Thurber W. R., Mattis R. L., Lin Y. M.: J. Electrochem. Soc., Vol. 127, No 10, 1980
13. Przewłocki H.: Electron Technology, No 3, 1970