

Pomiar koncentracji nośników większościowych w warstwach epitaksjalnych związków A^{III} B^{V} metodą napięcia przebicia

1. WSTĘP

Koncentracja nośników większościowych jest jednym z najważniejszych parametrów charakteryzujących materiały półprzewodnikowe. Możliwość jej szybkiego określenia jest szczególnie potrzebna w pomiarach produkcyjnych służących do bieżącej kontroli poprawności procesu technologicznego. Potrzeba stanowiska, które zapewniłoby taką kontrolę, doprowadziła do opracowania i zestawienia - w zakładzie Z-12 ITME - aparatury pomiarowej, która odpowiada tym wymaganiom.

Pomiar koncentracji elektronów jest wykonywany metodą napięcia przebicia. Jest to metoda szybka, nie wymagająca specjalnego przygotowania powierzchni oraz nieniszcząca. Pozwala ona na ocenę, z zadowalającą dokładnością, koncentracji elektronów w warstwach epitaksjalnych typu n arsenku galu, arsenofosforku galu i fosforku galu. Wraz z pomiarem fotoluminescencji pomiar napięcia przebicia jest podstawową informacją w ocenie jakości warstw epitaksjalnych GaAsP na podłożu GaAs i GaP/GaP. W materiale litym znajduje ona mniejsze zastosowanie ze względu na konieczność standardowej procedury przygotowania powierzchni próbek oraz możliwość pomiaru koncentracji tradycyjną metodą Halla. W strukturach warstwowych o znacznie różniących się parametrach (koncentracja, ruchliwość) pomiary metodą Halla dają zupełnie fałszywe wyniki i pomiar metodą napięcia przebicia jest jedną z niewielu możliwości oszacowania koncentracji powierzchniowej.

2. TEORETYCZNE PODSTAWY POMIARU KONCENTRACJI ELEKTRONÓW METODĄ NAPIĘCIA PRZEBICIA

Pomiar metodą napięcia przebicia polega na pomiarze napięcia na spolaryzowanym w kierunku zaporowym złączu metal-półprzewodnik, przy przepływie określonego prądu. Zależność napięcia przebicia U_p od szerokości przerwy energetycznej E_g dla sferycznego złącza skokowego o promieniu r_0 , ważną także dla GaAs i GaP, obliczyli Sze i Gibbons [1]:

$$U_p = 5,2 \cdot 10^{13} \cdot E_g^3 (2 \cdot n^{-3})^4 \gamma (w_b, r_{ef}) \quad (1)$$

gdzie n - koncentracja elektronów

r_{ef} - efektywny promień sferycznego złącza skokowego p-n

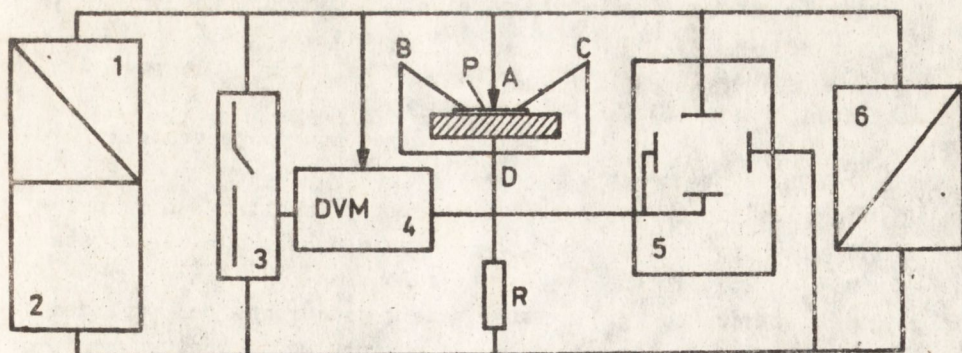
w_b - grubość warstwy ładunku przestrzennego

γ - współczynnik, zależny od r_{ef} , w_b , stałej dielektrycznej oraz natężenia pola krytycznego, przy którym zachodzi przebicie lawinowe.

Ogólna zależność teoretyczna (1) wskazuje na związek typu $U_p \sim n^{-3/4}$. Z zależności tej wynika, że tangens kąta nachylenia prostej we współrzędnych $\log U_p - \log n$ powinien wynosić $-0,75$. Wartości uzyskane eksperymentalnie znacznie odbiegają od tej wielkości - są prawie o połowę mniejsze. Świadczy to o niedoskonałości modelu matematycznego, za pomocą którego wyliczono zależność teoretyczną. Ten model nie uwzględnia zależności napięcia przebicia od takich parametrów jak np. nacisk na ostrze sondy, materiał, z którego jest wykonana sonda, jakość powierzchni i rodzaj obróbki, jakiej została ona poddana. Doświadczalnie stwierdzono, że wszystkie te czynniki wpływają na wartość mierzonego napięcia (np. ze wzrostem nacisku na ostrze napięcie spada). Nie można więc oprzeć się wyłącznie na zależnościach teoretycznych, lecz należy dobrać dla danego materiału odpowiedni materiał sondy, ustalić optymalny nacisk na ostrze, dobrać wartość prądu pomiarowego i odpowiedni materiał na kontakty omowe. Kryterium doboru jest stabilność i powtarzalność uzyskiwanych wyników. Po spełnieniu tych warunków należy ustalić doświadczalnie krzywą kalibracji wiążącą wartość napięcia przebicia bezpośrednio z koncentracją nośników większościowych w badanym materiale.

3. UKŁAD POMIAROWY

Pomiar napięcia przebicia jest prowadzony metodą impulsową. Impulsowa metoda pomiaru zapewnia znacznie mniejsze obciążenie prądowe złącza metal-półprzewodnik, co pozwala na uniknięcie niekorzystnych efektów związanych ze wzrostem temperatury w obszarze przyzłączowym i z niestabilnością napięcia przebicia. Schemat układu pomiarowego jest przedstawiony na rys. 1.



Rys. 1. Schemat blokowy aparatury pomiarowej:

1 - źródło prądu stałego, 2 - zasilacz, 3 - klucz elektroniczny, 4 - woltomierz cyfrowy, 5 - oscyloskop, 6 - blok formowania i kontroli kontaktów omowych, P - próbka, A - sonda pomiarowa, B, C - sprężynki dociskające, D - stolik pomiarowy, R - opornik wzorcowy

Mierzona płytka jest umieszczona na pokrytej cyną podstawie, odizolowanej elektrycznie od stolika X-Y i dociśnięta sprężynkami z fosforobrazu. Podstawka i sprężynki (także pokryte cyną) służą w czasie pomiaru jako kontakty omowe. Kontakty omowe formujemy rozładowując kondensator między kolejnymi parami kontaktów. Po uformowaniu obserwujemy charakterystykę prądowo-napięciową na ekranie oscyloskopu. Gdy kontakty zostaną właściwie uformowane, następuje zwarcie sprężynek dociskających z podstawką i opuszczenie sondy pomiarowej na powierzchnię płytki. Po naciśnięciu przycisku "Pomiar" następuje szybki wzrost prądu do wartości nastawionej w źródle prądu stałego. Przebieg tego impulsu jest również obserwowany na ekranie oscyloskopu. Gdy prąd osiąga żadaną wartość, włącza się układ pomiaru woltomierza cyfrowego. Po dokonaniu odczytu źródło zostaje zwarte. Czas pomiaru wynosi około 5 μ s.

4. KALIBRACJA

Aby posługiwać się metodą napięcia przebicia w celu określenia koncentracji elektronów, należy uprzednio ustalić optymalne warunki pomiaru oraz uzyskać krzywą kalibracji dla danego materiału. Materiał, z którego jest wykonane ostrze, promień ostrza oraz nacisk na ostrze sondy i wartość prądu pomiarowego są ustalane eksperymentalnie dla każdego materiału, a kryteriami oceny są stabilność i powtarzalność wyników.

Aby otrzymać krzywą kalibracji, należy dobrać odpowiednią liczbę płytek wzorcowych /zwykle około 20/ o znanych wartościach koncentracji

elektronów i dokonać na nich pomiarów kalibracyjnych. Zależność napięcia przebicia od koncentracji w układzie współrzędnych $\log U_p - \log n$ opisuje linia prosta nachylona pod kątem α do osi OX. Kąt α jest różny dla różnych materiałów. Standardowa procedura kalibracji dla nowego materiału jest prowadzona w kilku etapach.

A. Wybiera się płytki wzorcowe o koncentracjach pokrywających cały zakres koncentracji, występujący w procesie produkcyjnym.

B. Na wybrane płytki wzorcowe nanosi się bariery Schottky'ego /w przypadku związków półprzewodnikowych A^{III}B^V typu n naparowuje się czyste złoto w próżni około 10^{-7} Tr^x/ i kontakty omowe.

C. Na płytkach wzorcowych wybiera się obszary jednorodnie pod względem koncentracji. W tym celu przeprowadza się pomiary pojemnościowo-napięciowe barier Schottky'ego na całej powierzchni płytki. Wartość koncentracji elektronów oblicza się wg wzoru:

$$n = \frac{-2}{s^2 \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{d/1/c^2}{dV}} \quad (2)$$

gdzie ϵ_0 - przenikalność dielektryczna próżni

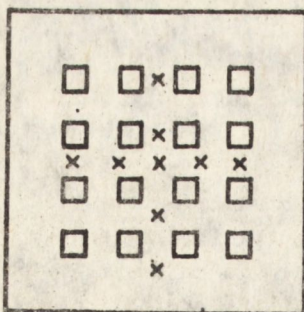
ϵ - stała dielektryczna półprzewodnika

S - powierzchnia diody Schottky'ego

C - pojemność diody

V - napięcie polaryzacji.

D. Na wybranych obszarach o niewielkim rozrzucie koncentracji na płytkach wzorcowych przeprowadza się pomiary napięcia przebicia. Należy dobrać taką wartość prądu pomiarowego i nacisku na ostrze sondy, aby przebiegi obserwowane na oscyloskopie były stabilne oraz aby wyniki były powtarzalne. Miejsca przeprowadzenia pomiaru kalibracyjnego są pokazane na rys. 2. W obszarze pomiarowym płytki wzorcowej dokonuje się 10 pomiarów



Rys. 2. Sposób prowadzenia pomiarów kalibracyjnych pomiędzy diodami Schottky'ego: x - punkt pomiarowy, □ - dioda Schottky'ego

$\frac{x}{1} \text{ Tr} \approx 1,33 \cdot 10^2 \cdot \text{Pa}$ /przeliczenie dotyczy całego artykułu/

(po 5 na dwóch prostopadłych kierunkach przechodzących przez środek obszaru). Wartość średnią napięcia przebicia obliczamy z 10 pomiarów. Przyporządkowujemy ją średniej koncentracji elektronów obliczonej z pomiarów na diodach znajdujących się w obszarze pomiarowym płytki wzorcowej.

E. Metodą najmniejszych kwadratów obliczamy parametry prostej kalibracyjnej we współrzędnych $\log U_p - \log n$.

5. WYNIKI POMIARÓW

Pomiar koncentracji elektronów metodą napięcia przebicia znalazł bezpośrednie zastosowanie w bieżącej kontroli procesu technologicznego produkcji warstw epitaksjalnych związków półprzewodnikowych typu $A^{III}B^V$. Doświadczalnie stwierdzono, że:

- najlepszym materiałem na ostrze pomiarowe jest węgiel wolframu,
- optymalna wartość nacisku na ostrze wynosi 40 G^{MN} ,
- wartość natężenia prądu pomiarowego zależy od rodzaju mierzonego materiału i waha się od 1 do 10 mA.

Należy zaznaczyć, że koncentracja jest mierzona w mikroobszarze /grubość warstwy ładunku przestrzennego wynosi około $1 \mu\text{m}$ /. Umożliwia to pomiar rozkładu koncentracji elektronów na powierzchni płytki i w głębi /na szlifach skośnych/.

Metoda ta została zastosowana po raz pierwszy do pomiarów warstw epitaksjalnych arsenofosorku galu. Potem w ulepszonej formie /z zastosowaniem metody impulsowej/ wykorzystano ją do pomiarów warstw epitaksjalnych GaP na podłożu GaP.

Metodą opisaną w punkcie 4 obliczono krzywe kalibracji opisujące zależność napięcia przebicia od koncentracji:

- dla warstw epitaksjalnych GaP/GaP; $I = 2 \text{ mA}$, $P = 40 \text{ G}$

$$U_p = 41,2 \left(\frac{n}{10^{16}} \right)^{-0,413} \quad (3)$$

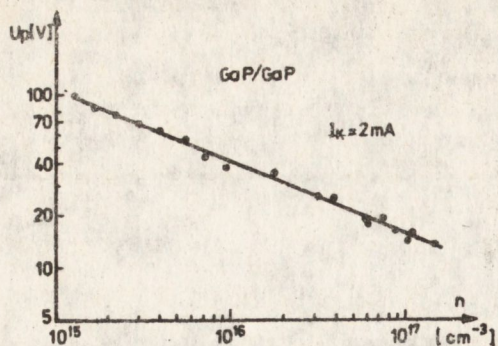
Do otrzymania krzywej kalibracji wybrano 18 próbek wzorcowych o koncentracjach elektronów w zakresie $5 \cdot 10^{15} + 1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

Współczynnik korelacji był równy $-0,978$ (rys. 3);

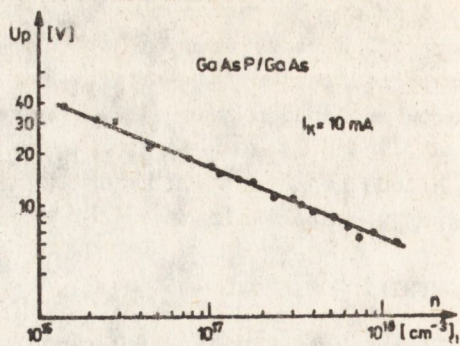
- dla warstw epitaksjalnych GaAsP/GaAs; $I = 10 \text{ mA}$, $P = 40 \text{ G}$

$$U_p = 42,6 \left(\frac{n}{10^{16}} \right)^{-0,411} \quad (4)$$

$1 \text{ G} = 0,980 665 \cdot 10^{-2} \text{ N}$ (przeliczenie dotyczy całego artykułu)



Rys. 3. Krzywa kalibracji dla warstw epitaksjalnych GaP na podłożu GaP; nacisk na ostrze sondy 40 G



Rys. 4. Krzywa kalibracji dla warstw epitaksjalnych GaAsP/na podłożu GaAs; nacisk na ostrze sondy 40 G

Do wyznaczenia krzywej kalibracji użyto 18 próbek wzorcowych o koncentracjach elektronów w zakresie $2 \cdot 10^{16} + 8 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

Uzyskano współczynnik korelacji równy $-0,999$ (rys. 4).

Krzywe kalibracji dla obydwu materiałów są prawie identyczne. Można jednak zauważyć, że obejmują inny zakres koncentracji elektronów oraz zostały uzyskane przy innych wartościach natężenia prądu pomiarowego. Należy zaznaczyć, że krzywe kalibracyjne będą się różnić w zależności od konkretnego rozwiązania układu pomiarowego. W pracy [2] uzyskano wyniki zbliżone do naszych. Nachylenie prostych kalibracji nie zależało od rodzaju materiału, lecz dla danej wartości natężenia prądu pomiarowego krzywe GaAs i GaP pokrywały się. Za pomocą metod statystycznych oszacowano dokładność metody na $\pm 15\%$, co jest wartością porównywalną z dokładnością tradycyjnej metody Halla.

Omówiona w pracy metoda pomiarowa w pełni sprostała wymaganiom stawianym kontroli procesu przy produkcji warstw epitaksjalnych związków półprzewodnikowych typu $A^{III}B^V$. Pomiar jest szybki i prosty. Przy optymalnym doborze warunków pomiaru otrzymana krzywa kalibracji układu nie zależy w istotny sposób od promienia ostrza sondy. Dzięki temu pracownik obsługujący stanowisko /kontrolując co kilka dni kalibrację układu/ może przez wiele miesięcy posługiwać się tą samą krzywą kalibracji.

/Tekst dostarczone 1985.01.29./

LITERATURA

1. Sze S.M., Gibbons G.: Solid State Electronics, 9, 831 /1966/.
2. Heine G., Klose H., Mika J., Thamm E.: Phys. Stat. Sol. /a/, 17, 251, /1973/.
3. Klose H., Thamm E.: Phys. Stat. Sol. /a/, 4, K105 /1971/.