

Ocena stopnia zdefektowania warstwy ładunku przestrzennego dyfuzyjnych złącz p-n w arsenku galu

WSTĘP

W przypadku pracy złącza p-n przy polaryzacji wstecznej, zdefektowanie jego obszaru czynnego - warstwy ładunku przestrzennego - będzie określać naruszenie jednorodności rozkładu pola elektrycznego w tej warstwie. Niejednorodność rozkładu pola elektrycznego może być wynikiem zarówno obecności defektów strukturalnych lub zanieczyszczeń w obszarze ładunku przestrzennego, jak i naruszeń geometrii tego obszaru.

Ocena zdefektowania warstwy ładunku przestrzennego ma szczególne znaczenie dla dyfuzyjnych złącz p-n w arsenku galu, które, jak świadczą anomalie ich charakterystyk [1-3], cechuje znacznie większe zdefektowanie niż na przykład epitaksjalne złącza p-n w arsenku galu, bądź dyfuzyjne złącza p-n w krzemie.

Jakościowa ocena zdefektowania warstwy ładunku przestrzennego złącza p-n, poprzez ocenę jednorodności rozkładu pola elektrycznego, możliwa jest do przeprowadzenia na podstawie analizy charakterystyki pojemnościowo-napięciowej i prądowo-napięciowej złącza p-n w obszarze przebiecia.

ANALIZA CHARAKTERYSTYKI PRĄDOWO-NAPIĘCIOWEJ I POJEMNOŚCIOWO-NAPIĘCIOWEJ DYFUZYJNEGO ZŁĄCZA P-N

Równanie Poissona opisuje rozkład potencjału w złączu p-n. Traktując złącze p-n jako kondensator płaski, a więc zakładając, że gęstość ładunku przestrzennego jest funkcją współrzędnej x , równanie Poissona możemy napisać w postaci:

$$\frac{d^2 \psi}{dx^2} = - \frac{\rho}{\epsilon \epsilon_0} , \quad /1/$$

gdzie: $\psi = \Psi(x)$ - potencjał, $\rho = \rho(x)$ - gęstość ładunku, x - oś prostopadła do płaszczyzny złącza p-n, $\epsilon \epsilon_0$ - przenikalność dielektryczna półprzewodnika.

Przyjmując założenia [4], że:

- zjonizowane są wszystkie domieszki,
- granice złącza p-n, x_p i x_n są nierozmyte,
- w warstwie ładunku przestrzennego nie ma nośników prądu /ma miejsce tzw. pełne zubożenie warstwy/,
- poza obszarem warstwy ładunku przestrzennego ładunki zjonizowanych domieszek są skompensowane,

możemy łatwo znaleźć wyrażenie określające pojemność warstwy ładunku przestrzennego złącza p-n:

$$C(U) = \frac{dq}{dV} = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{x_p - x_n} = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{W(U)}, \quad /2/$$

gdzie $W(U) = x_p + x_n$ jest szerokością warstwy ładunku przestrzennego złącza p-n.

Dla dyfuzyjnych złącz p-n, w ograniczonym zakresie napięć, zależność pojemności warstwy ładunku przestrzennego od napięcia można zgodnie z [4] wyrazić równaniem:

$$C(U) = A (U_c - U)^{-n}, \quad /3/$$

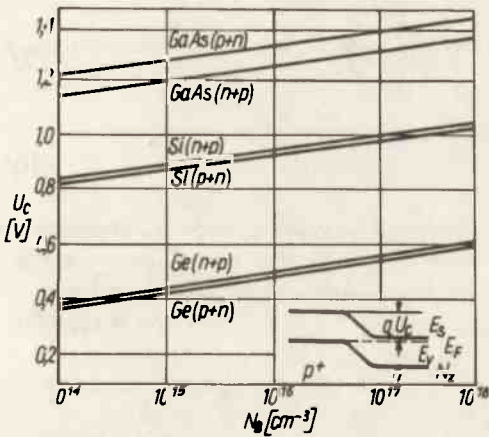
gdzie A i n są stałymi, przy czym $2 \leq n \leq 3$.

Granicznymi przypadkami zależności /3/, są wyrażenia określające zależność pojemności od napięcia niesymetrycznych skokowych $n = 2/$ i liniowych $n = 3/$ złącz p-n:

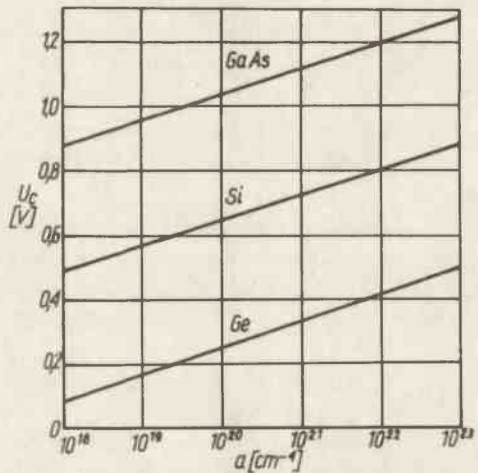
$$C_1/U = A_1/U_{c1} - U^{-\frac{1}{2}}, \quad /4/$$

$$C_2/U = A_2/U_{c2} - U^{-\frac{1}{3}}.$$

W równaniach /3/ i /4/ U_c jest napięciem odcięcia pojemnościowo-napięciowej charakterystyki złącza p-n. Jego wartość jest w przybliżeniu równa kontaktowej różnicy potencjałów /napięciu dyfuzyjnemu/. Na rys. 1 i 2 przedstawiono, zgodnie z [5], zależności kontaktowej różnicy potencjałów dla niesymetrycznych skokowych i liniowych złącz p-n w GaAs, Si i Ge odpowiednio od koncentracji domieszki w bazie N_B i wartości gradientu domieszki a .



Rys. 1. Zależność kontaktowej różnicy potencjałów dla niesymetrycznych skokowych złącz p-n w GaAs, Si i Ge od koncentracji domieszki w bazie [5].



Rys. 2. Zależność kontaktowej różnicy potencjałów dla liniowych złącz p-n w GaAs, Si i Ge od wartości gradientu domieszki w obszarze złącza p-n [5].

Zależność szerokości warstwy ładunku przestrzennego od napięcia polaryzacji łatwo otrzymamy korzystając z zależności /2/ i /3/.

$$W/U = B/U_c - U/n \quad /5/$$

Gdy znany jest rozkład domieszki, natężenie pola elektrycznego w warstwie ładunku przestrzennego można określić poprzez scałkowanie równania Poissona. Natomiast maksymalne natężenie pola elektrycznego w warstwie ładunku przestrzennego przy danym napięciu polaryzacji U można określić korzystając z zależności pojemności warstwy ładunku przestrzennego od napięcia polaryzacji. Tak więc, korzystając z wyrażenia określającego zależność pojemności warstwy ładunku przestrzennego od napięcia /3/ i całkując równanie Poissona, otrzymamy /6/:

$$E_m/U = A \frac{n}{n-1} \cdot /U_c - U/ \frac{n-1}{n} = \frac{1}{E \cdot E_0 S} \cdot \frac{n}{n-1} \cdot \frac{U_c - U}{C/U}, \quad /6/$$

lub, wyrażając maksymalne natężenie pola elektrycznego w warstwie ładunku przestrzennego poprzez jej szerokość:

$$E_m/U = \frac{n}{n-1} \cdot \frac{U_c - U}{W/U}. \quad /7/$$

Zależności pojemności warstwy ładunku przestrzennego, jej szerokości i maksymalnego natężenia pola elektrycznego w tej warstwie, dla zmiennej zależności $X = /U_c - U/$, w skali podwójnie logarytmicznej będą prostymi o współczynnikach kierunkowych $-\frac{1}{n} + \frac{1}{n}, \frac{n-1}{n}$;

$$\lg C(U) = \lg \left[b - \frac{1}{n} (U_c - U) \right], \quad /8/$$

$$\lg W(U) = \lg \left[c + \frac{1}{n} (U_c - U) \right] \quad /9/$$

$$\lg E_m(U) = \lg \left[d + \frac{n-1}{n} (U_c - U) \right] \quad /10/$$

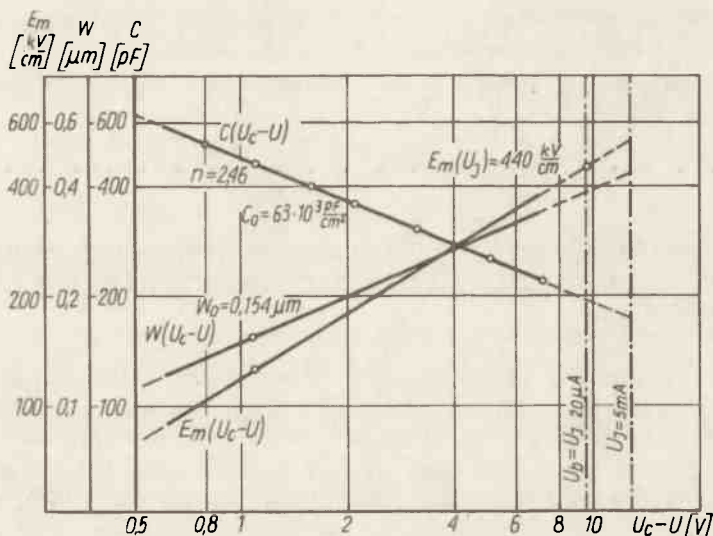
W równaniach tych mamy dwa nieznanne współczynniki: współczynnik n , charakteryzujący rozkład domieszki w warstwie ładunku przestrzennego oraz kontaktową różnicę potencjałów U_c . Zazwyczaj kontaktową różnicę potencjałów określa się z napięcia odcięcia charakterystyki pojemnościowej złącza p-n / $C^{-n} = f(U)$. W tym przypadku założenie określonej wartości n , tzn. rozróżnianie złącz na zbliżone do skokowych, gdy $n = 2$, lub bliskie liniowych, gdy $n = 3$, jak to się często spotyka w literaturze [7-9], dałoby możliwość wyznaczenia napięcia odcięcia charakterystyki pojemnościowej złącz p-n. Jednak błąd popełniony przy obliczaniu wartości W i E_m , a wynikający z przyjęcia niewłaściwej wartości współczynnika n , byłby wtedy bardzo wysoki, szczególnie przy znacznej polaryzacji ujemnej złącza $/U \gg U_c/$. Tego należy unikać, gdyż zasadnicze znaczenie ma dla nas ocena parametrów złącza p-n

w obszarze przebicia. Dlatego lepiej jest przyjąć określoną stałą, dla badanej grupy złącz p-n, wartość kontaktowej różnicy potencjałów U_c .

Znajc w przybliżeniu charakter rozkładu domieszki w obszarze złącza p-n i koncentracji domieszki w materiale wyjściowym lub, oszacowaną z pomiarów pojemności złącza p-n przy polaryzacji zerowej, wartość gradientu domieszki i korzystając odpowiednio z zależności przedstawionych bądź na rys. 1, bądź na rys. 2, znajdujemy odpowiednią wartość U_c . Wówczas z zależności C/U wykreślonej w skali podwójnie logarytmicznej możemy określić n , a następnie wykreślając zależność $C^{-n} = f/U$, dokładniej już określić wartość kontaktowej różnicy potencjałów.

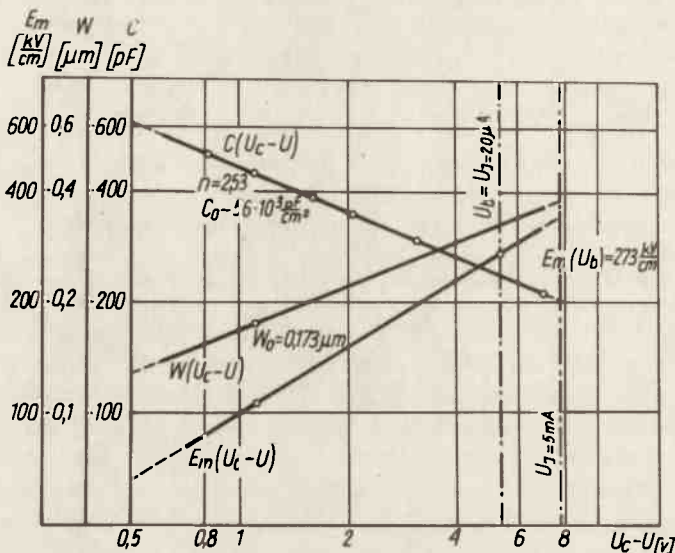
Dokładne określenie dla każdego złącza p-n obu współczynników - n i U_c /co jest możliwe przy graficznym rozwiązaniu równania z dwiema niewiadomymi/ wymaga opracowania odpowiedniego programu dla maszyny matematycznej.

Na rys. 3 i 4 przedstawiono przykłady, przeprowadzonej w podany wyżej sposób, analizy charakterystyk pojemnościowych dyfuzyjnych złącz p-n w arsenku galu. Podano wartości pojemności właściwej /pF/cm²/ i szerokości warstwy ładunku przestrzennego przy zerowej polaryzacji złącza p-n oraz wartość maksymalnego natężenia pola elektrycznego przy napięciu przyjętym jako napięcie przebicia tzn. przy którym natężenie prądu płynącego przez złącze wynosi $I = 20 \mu A$. Zaznaczono też wartość napięcia wstecznego złącza p-n zbliżonego do zakresu napięć przy których przebicie powoduje jego zniszczenie / $I = 5mA$ /. Skorzystano w tym celu z analizy charakterystyki prądowo-napięciowej złącza p-n.



Rys. 3. Zależność pojemności oraz szerokości i maksymalnego natężenia pola elektrycznego warstwy ładunku przestrzennego dyfuzyjnego złącza p-n w GaAs /dyfuzja Zn z pary nasyconej, $p_{As_4} = 1,5 \text{ atm}$ / od napięcia polaryzacji wstecznej / $U_c - U$ /.

Tak więc zaproponowana metodyka badania dyfuzyjnych złącz p-n umożliwia /na podstawie danych pojemnościowych/ ocenę charakteru rozkładu domieszki w warstwie ładunku przestrzennego /poprzez określenie wartości współczynnika η /, oraz określenie szerokości i maksymalnego natężenia pola elektrycznego warstwy dla dowolnego napięcia polaryzacji wstecznej złącza p-n.



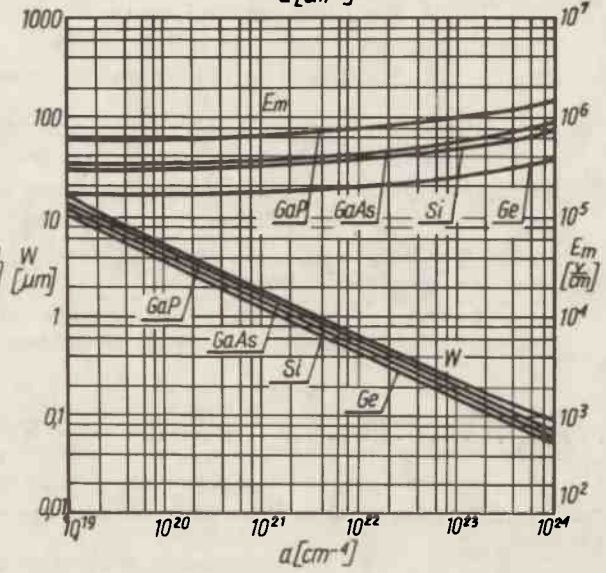
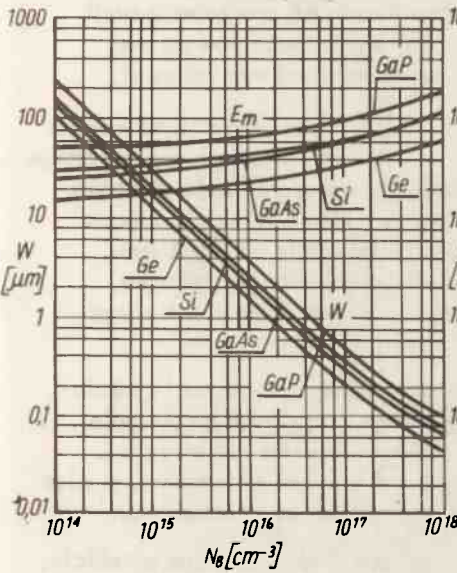
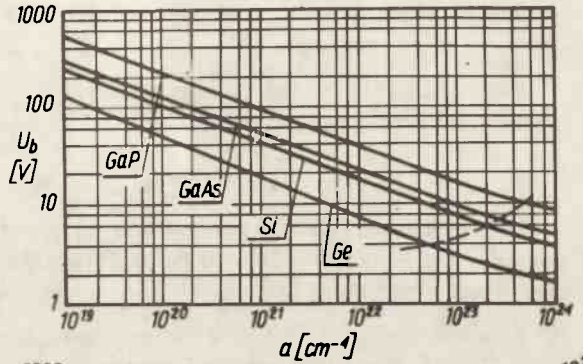
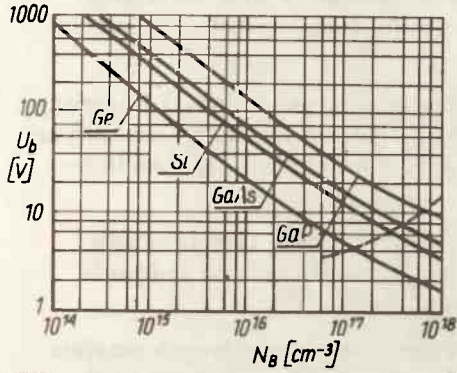
Rys. 4. Zależność pojemności oraz szerokości i maksymalnego natężenia pola elektrycznego warstwy ładunku przestrzennego dyfuzyjnego złącza p-n w GaAs /dyfuzja Zn z pary nasyconej przy dysocjacyjnym ciśnieniu par arsenu, $p_{\text{As}} = 10^{-5} \text{ atm}$ / od napięcia polaryzacji wstecznej $U_c - U$.

PARAMETRY ZŁĄCZ P-N PRZY PRZEBICIU - NAPIĘCIE PRZEBICIA, SZEROKOŚĆ I MAKSYMALNE NATĘŻENIE POLA ELEKTRYCZNEGO W WARSTWIE ŁADUNKU PRZESTRZENNEGO

Dla przebicia związanego z jonizacją zderzeniową, znając zależności współczynników jonizacji od pola elektrycznego, możemy obliczyć napięcie przebicia złącza p-n oraz szerokość i maksymalne natężenie pola elektrycznego w warstwie ładunku przestrzennego przy przebiciu. Dla określenia szerokości warstwy ładunku przestrzennego przy przebiciu, należy metodą kolejnych przybliżeń, z pomocą ETO, rozwiązać równanie Poissona przy warunkach brzegowych odpowiadających warunkom jonizacji zderzeniowej.

Na rys. 5 i 6 podano, dla niesymetrycznych skokowych i liniowych złącz p-n, teoretyczne zależności napięć przebicia, szerokości i maksymalnego natężenia pola elektrycznego warstwy ładunku przestrzennego przy przebiciu od koncentracji domieszki w bazie N_B i gradientu domieszki w obszarze złącza a [5, 10]. Liniami przerywanymi, na krzywych wyrażających zależności U_B/N_B i U_B/a , oznaczono

górný zakres wartości N_B i a , dla których możliwe jest korzystanie z równań opisujących jonizację zderzeniową. Przy wyższych wartościach N_B i a coraz większą rolę będzie odgrywać zjawisko Zenera.



Rys. 5. Zależność napięcia przebicia oraz szerokości i maksymalnego natężenia pola elektrycznego warstwy ładunku przestrzennego przy przebiciu skokowych niesymetrycznych złączy p-n w GaAs, Si, Ge i GaP od koncentracji domieszki w bazie [5, 10].

Rys. 6. Zależność napięcia przebicia oraz szerokości i maksymalnego natężenia pola elektrycznego warstwy ładunku przestrzennego przy przebiciu liniowych złączy p-n w GaAs, Si, Ge i GaP od wartości gradientu domieszki w obszarze złącza p-n [5, 10].

Znając, z analizy charakterystyk prądowo-napięciowych i pojemnościowo-napięciowych badanych złączy p-n w obszarze przebicia, wartości maksymalnego natężenia pola elektrycznego dla danej szerokości warstwy ładunku przestrzennego, możemy sądzić o tym, czy jonizacja zderzeniowa występuje równomiernie w całej warstwie zaporowej czy lokalnie w różnych jej obszarach.

Przebiecie o charakterze lokalnym, tzn. przebiecie mające miejsce przy natężeniu pola elektrycznego znacznie niższym od teoretycznego odpowiadającego danej szerokości warstwy ładunku przestrzennego, będzie świadczyć o niejednorodnym rozkładzie pola elektrycznego w warstwie ładunku przestrzennego. Porównując te dane dla szeregu badanych złączy p-n możemy uzyskać informacje o stopniu zdefektowania ich warstw ładunku przestrzennego.

Aby w pełni skorzystać z danych teoretycznych zamieszczonych na rys. 5 i 6 należy jednak dokonać pewnych uproszczeń, przyjmując jako złącza p-n bliskie niesymetrycznym złączom skokowym, złącza p-n o $2 \leq n < 2,5$, a jako bliskie złączom liniowym - złącza p-n o $n \geq 2,5$.

Rozpatrzmy przydatność przedstawionej powyżej metodyki oceny zdefektowania warstwy ładunku przestrzennego dyfuzyjnych złączy p-n w arsenku galu na podstawie przykładów podanych na rys. 4 i 5.

Przeprowadzając badanie ich charakterystyk pojemnościowo-napięciowych przyjęto $U_c = 1,1$ V. W tabelicy przedstawiono warunki przeprowadzonych procesów dyfuzji w rezultacie których otrzymano badane złącza p-n oraz wyniki przeprowadzonej analizy ich charakterystyk: prądowo-napięciowej i pojemnościowo-napięciowej.

Widzimy, że istnieje zasadnicza różnica pomiędzy obliczonymi wartościami maksymalnego natężenia pola elektrycznego przy których w badanych złączach p-n następuje przebiecie. Znacznie niższe od teoretycznego, maksymalne natężenie pola elektrycznego w warstwie ładunku przestrzennego, przy którym ma miejsce przebiecie złącza p-n otrzymanego poprzez dyfuzję cynku przy dysocjacyjnym ciśnieniu par arsenu, świadczy, że ma ono charakter lokalny. W pewnych obszarach warstwy ładunku przestrzennego natężenie pola elektrycznego jest znacznie wyższe od obliczonego i właśnie w tych obszarach następuje przebiecie.

Inaczej jest w złączu p-n otrzymanym poprzez dyfuzję cynku przy wysokim ciśnieniu nadmiarowych par arsenu $P_{As_4} \geq 1,5$ atm/. Obliczona wartość natężenia pola elektrycznego, przy której następuje przebiecie jest bliska wielkości teoretycznej. Tak więc rozkład natężenia pola elektrycznego przy przebieciu jest jednorodny, a więc zdefektowanie warstwy ładunku przestrzennego tego złącza p-n jest nieznaczne.

Otrzymane rezultaty zgodne są z analizą procesu dyfuzji cynku. Lokalne przebiecie, mające miejsce w złączach p-n otrzymanych poprzez dyfuzję cynku przeprowadzoną przy dysocjacyjnym ciśnieniu par arsenu, związane jest z pogorszeniem się jakości strukturalnej arsenu galu w czasie dyfuzji. Rozkład materiału wyjściowego związany z odparowaniem arsenu wprowadza znaczną ilość defektów strukturalnych w obszar warstwy ładunku przestrzennego. Jednocześnie, w związku ze znacznym wpływem składowej międzywęzłowej strumienia dyfundującego cynku przy dyfuzji bez nadmiarowych par arsenu, otrzymane w rezultacie dyfuzji złącze p-n jest niepełne, co jest dodatkową przyczyną niejednorodnego rozkładu pola elektrycznego w warstwie ładunku przestrzennego.

Wnioski otrzymane w wyniku oceny zdefektowania warstwy ładunku przestrzennego poprzez analizę charakterystyk I/U i C/U badanych złączy p-n potwierdziły pomiarowo zależności napięcia przebiecia tych złączy od temperatury [3]. W przypadku złączy p-n otrzymanych przy dysocjacyjnym ciśnieniu par arsenu niejednoznaczna zależność napięcia przebiecia od temperatury świadczy o tym, że mamy do czynienia ze złożo-

WARUNKI DYFUZJI ORAZ PARAMETRY OTRZYMANYCH W ICH WYNIKU ZŁĄCZ P-N

Temperatura dyfuzji 850°C. Parametry wyjściowego GaAs: $N_D = 2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_n = 2000 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$,
 $N_{\text{dysl.}} \approx 0,6 \cdot 10^4 - 2 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-2}$

N ^o	Warunki dyfuzji ^{x/}		C ₀	n	a	U	U	I	W	E _{fm}	E _{fm}
	Domieszka	PA ₄ atm									
1	Zn	10 ⁻⁵	56 · 10 ³	2,53	15,5 · 10 ²³	4,2	6,8	4600	0,312	273	370
2	para nasyciona	1,5	63 · 10 ³	2,46	-	7,5	12,0	94	0,380	440	522
	C _{Zn} ≤ 4 · 10 ¹⁸	-3									

x/ Warunki w ampule w czasie dyfuzji / koncentrację par cynku i ciśnienie por osensu/ obliczono zgodnie z metodyką podaną w [11].

nym mechanizmem przebicia. Prawdopodobnie na jonizację zderzeniową nakłada się inny mechanizm, związany z defektami i na przykład lokalnym przebiciem termicznym.

Opisana powyżej metodyka, umożliwiająca ocenę stopnia zdefektowania warstwy ładunku przestrzennego złącza p-n, może być stosowana zarówno do aplikacyjnej oceny, na modelach uproszczonych przyrządów półprzewodnikowych, jakości strukturalnej materiału wyjściowego, jak i prawidłowości jego obróbki w cyklu technologicznym wytwarzania przyrządów. W pierwszym przypadku niezbędnym jest stosowanie "bezdefektowych" dyfuzji, tzn. dyfuzji w czasie których nie ulega zmianie jakość strukturalna materiału wyjściowego w obszarze złącza p-n.

W zasadzie opisana metodyka dotyczy arsenku galu. Niemniej może być ona stosowana i dla innych materiałów półprzewodnikowych.

PODSUMOWANIE

Podano metodykę badania elektrycznych parametrów dyfuzyjnych złącza p-n w arsenku galu umożliwiającą jakościową ocenę zdefektowania warstwy ładunku przestrzennego. Metodyka ta pozwala na ocenę zarówno jakości materiału wyjściowego, jak i jej zmian w cyklu produkcji przyrządów półprzewodnikowych. Ma to zasadnicze znaczenie dla prowadzonych, na modelach uproszczonych przyrządów półprzewodnikowych, aplikacyjnych badań jakości materiału wyjściowego i prawidłowości jego obróbki w cyklu technologicznym wytwarzania przyrządów.

Wykaz oznaczeń

A	- wielkość stała
a	- gradient domieszki w obszarze złącza p-n
B	- wielkość stała
b	- wielkość stała
C	- pojemność warstwy ładunku przestrzennego złącza p-n
c	- wielkość stała
C_0	- pojemność warstwy ładunku przestrzennego przy zerowej polaryzacji złącza p-n
C_{Zn}	- koncentracja par cynku w ampule
d	- wielkość stała
E_m	- maksymalne natężenie pola elektrycznego w warstwie ładunku przestrzennego złącza p-n
I	- natężenie prądu
n	- współczynnik charakteryzujący rozkład domieszki w obszarze ładunku przestrzennego
N_B	- koncentracja domieszki w bazie złącza p-n
N_D	- koncentracja donorów
N_{dysl}	- gęstość dyslokacji
PA_{s4}	- ciśnienie par arsenu
q	- ładunek elektryczny
S	- pole powierzchni złącza p-n
U	- napięcie polaryzujące złącze p-n

U_b	- napięcie przebicia
U_c	- kontaktowa różnica potencjału /napięcie dyfuzyjne/
W	- szerokość warstwy ładunku przestrzennego
x	- współrzędna
$\epsilon\epsilon_0$	- przenikalność dielektryczna półprzewodnika
μ_n	- ruchliwość elektronów
ψ	- potencjał
q	- gęstość ładunku przestrzennego

Literatura

1. Хлудков С.С., Машнин С.В., Лавищев Т.Т., Вяткин А.П., Преснов В.А.: Зависимость характеристик диффузионных электроно-дырочных р-п переходов от условий их изготовления. Сб. арт. "Арсенид галлия" Тгу, Томск, 1968 г.
2. Pietras E.: Дефекты диффузионных р-п переходов в арсениде галлия. Тезисы всеобщей конференции по прогнозированию надежности изделий электронной техники. Киев, 1971 г.
3. Pietras E., Darek B.: Parametry elektryczne dyfuzyjnych złącz р-п w arsenku galu. Prace ПЕ 3, 31, 1971.
4. Берман Л.С.: Введение в физику варикапов, "Наука", Ленинград, 1968 г.
5. Sze C.M.: Physics of semiconductor devices. J. Willey and Sons, N.Y. 1969, /Тłumaczenie ros. "Energia", Moskwa, 1973/.
6. Берман Л.С.: Определение электрического поля в р-п переходах из емкостных измерений, физика и техника полупроводников, 4, 3, 609, 1970 г.
7. Бурдуков Я.М., Мескин С.С., Наследов Д.Н., Каренков Б.В.: Исследования р-п переходов в арсениде галлия по зависимости емкости от напряжения. Радиотехника и электроника, 3, 468, 1965.
8. Наследов Д.Н., Каренков Б.В.: Электрический пробой р-п переходов в арсениде галлия. Физика твердого тела, 5, 4, 1182, 1963 г.
9. Dumin D.J., Pearson G.L.: Properties of gallium arsenide diodes between 4, 2 and 300K. J. Appl. Phys. 36, 11, 3418, 1965.
10. Sze C.M., Gibbons G.: Avalanche breakdown voltages of abrupt and lineary graded р-п junctions in Ge, Si, GaAsP and GoP. Appl. Phys. Letters 8, 111, 1966.
11. Darek B., Pietras E.: Technologiczne aspekty dyfuzji domieszek w arsenku galu. Archiwum Elektroniki 21, 385, 1972.