

Określenie parametrów elektrycznych epitaksjalnych warstw arsenofosorku galu osadzonych na podłożach GaAs

WSTĘP

W chwili obecnej do wytwarzania elementów świecących, niezależnie od arsenku i fosorku galu, coraz szerzej stosuje się arsenofosorek galu. Z $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ można wytworzyć diody świecące w szerokim zakresie długości fal, w zależności od wartości x . Praktyczne zastosowanie znajduje arsenofosorek galu o składzie $x = 0,3 \pm 0,5$ oraz arsenofosorek galu domieszkowany azotem, o składzie $0,7 \pm 0,9$. Taki materiał pozwala na wytworzenie diod emitujących promieniowanie w zakresie od czerwonego do zielonego. Do otrzymywania diod świecących są zazwyczaj wykorzystywane warstwy epitaksjalne osadzone na podłożu GaAs lub GaP.

W celu przeprowadzenia oceny własności elektrycznych warstw epitaksjalnych $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$, do procesu epitaksji wprowadza się wysokooporową płytkę kontrolną. Bezpośrednia ocena parametrów elektrycznych warstw otrzymanych na wysokooporowym podłożu jest jednak obciążona dużym błędem, ze względu na istnienie warstwy przejściowej o zmiennej wartości parametru x . Celem oceny parametrów elektrycznych warstwy epitaksjalnej o stałej wartości parametru x zazwyczaj usuwa się podłoże wraz z warstwą przejściową. Jednak ten sposób nastręcza wiele trudności natury mechanicznej, zwłaszcza w przypadku warstw cienkich. W prezentowanej pracy omówiono przeprowadzone pomiary parametrów hallowskich epitaksjalnych warstw arsenofosorku galu o składzie $x = 0,33 \pm 0,43$, osadzonych na podłożu z półizolacyjnego GaAs. Stosowano technikę pomiaru warstwy epitaksjalnej łącznie z warstwą przejściową oraz pomiaru warstwy przejściowej po usunięciu warstwy o stałym x . Na podstawie tych pomiarów oceniano parametry elektryczne warstwy epitaksjalnej o stałym składzie oraz uzyskane wyniki porównano z wynikami otrzymanymi metodą usuwania podłoża i warstwy przejściowej.

1. TEORIA

W arsenofosorku galu o $x < 0,46$ dominują proste przejścia energetyczne, natomiast przy $x > 0,46$ przejścia skośne. Jest to związane ze zmianą wysokości minimum Γ i X przy zmianie składu. Rozkład elektronów pomiędzy minima Γ i X jest funkcją odległości energetycznej pomiędzy minimami Γ_1 i X_1 i gęstości stanów w obydwu minimum. Gęstość stanów jest zależno natomiast od masy efektywnej elektronów w danym minimum. Masy efektywne elektronów są odpowiednio równe [1]:

$$m_{\Gamma}^* = 0,072 / 1+x / m_0 \quad (1)$$

$$m_x^* = 1,2 m_0 \quad (2)$$

Dla $x \ll 0,46 / x < 0,3$ przeważać będą elektrony o dużej ruchliwości i małej masie efektywnej z minimum Γ , natomiast dla $x \gg 0,46 / x > 0,55$ o parametrach materiału będą decydować elektrony o niskiej ruchliwości i dużej masie efektywnej z minimum X. W podanych wyżej przypadkach można zaniedbać oddziaływanie drugiego pasma. Dla $0,3 < x < 0,55$ przy obliczaniu koncentracji elektronów należy uwzględnić oddziaływanie obydwu pasm. Stosunek koncentracji elektronów w minimum Γ do całkowitej koncentracji elektronów, zgodnie ze statystyką Boltzmana i prostym modelem dwupas-mowym, opisuje się następującą zależnością:

$$f = \frac{n_{\Gamma}}{n_{\Gamma} + n_x} = \frac{1}{1 + N_{\Gamma} / N_x \exp(\Delta E / kT)} \quad (3)$$

gdzie: n_{Γ} , n_x - koncentracje elektronów w odpowiednich minimach

N_{Γ} , N_x - gęstości stanów w odpowiednich minimach.

W obecności dwóch typów elektronów o różnych ruchliwościach i koncentracjach mierzona ruchliwość hallowska μ_H jest wielkością efektywną, którą można wyrazić następującym wzorem:

$$\mu_H = \frac{n_{\Gamma} \mu_{\Gamma}^2 + n_x \mu_x^2}{n_{\Gamma} \mu_{\Gamma} + n_x \mu_x} = \mu_x \frac{f/b^2 - 1 / + 1}{f/b - 1 / + 1} \quad (4)$$

gdzie: μ_{Γ} - ruchliwość elektronów w prostym minimum Γ

μ_x - ruchliwość elektronów w skośnym minimum X

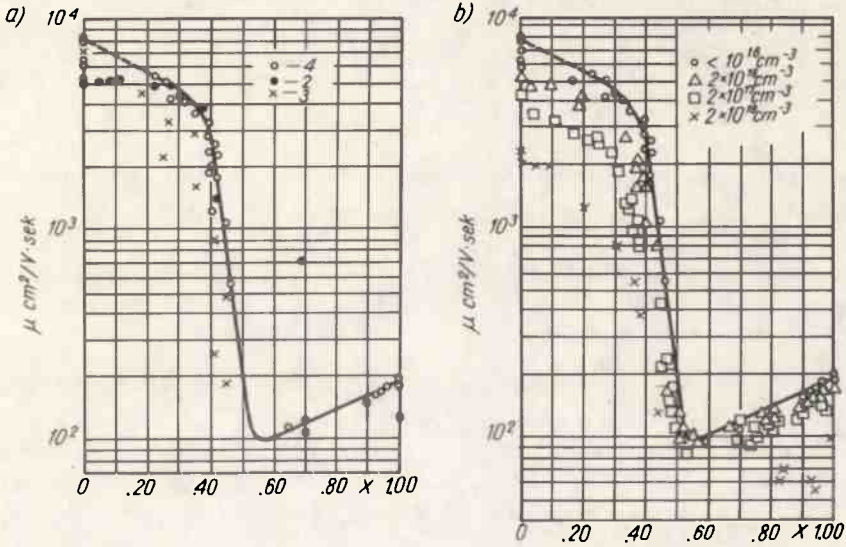
$b = \mu_{\Gamma} / \mu_x$.

Jak wynika z wzoru (4) gdy $f = 1$ /wszystkie elektrony w minimum Γ ; $x < 0,3$ / $\mu_H = \mu_{\Gamma}$, natomiast gdy $f = 0$ /wszystkie elektrony w minimum X; $x > 0,55$ / $\mu_H = \mu_x$. W zakresie składów $0,3 < x < 0,55$ jest spodziewany silny spadek ruchliwości.

Stosunek ruchliwości b , obliczony na podstawie porównania ruchliwości czystego GaAs i GaP, wynosi ok. 30.

Na rysunkach 1a i 1b podano wartość ruchliwości dla różnych składów i koncentracji elektronów, otrzymane eksperymentalnie przez Tietjena i Weisberga [2], Grovesa [4] i Stewarta [3]. Widać, że dla materiału o niskiej koncentracji donorów ruchliwość maleje od $7000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ w GaAs do ok. $3000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ dla $x = 0,3$. W zakresie skośnej przerwy energetycznej ruchliwość maleje z około $190 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ w GaP do około $100 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ dla $x = 0,55$. Pomiędzy $x = 0,3$ i $x = 0,55$ istnieje przewidziany ostry spadek ruchliwości. Dla $0 < x < 0,3$ spadek ten znacznie przerasta spadek obliczony na podstawie wzrostu masy efektywnej elektronów w minimum Γ . Także pomiędzy $x = 0,55$ i $x = 1$ nie można go obliczyć na podstawie rozpatrywanego modelu dwupas-mowego. Niezgodność pomiędzy wartościami ruchliwości obliczonymi teoretycznie /korzystając

z zależności (2) i (3) / i wyznaczonymi doświadczalnie dla $0 < x < 0,3$ oraz $0,55 < x < 1$ może być wytłumaczona przy uwzględnieniu rozpraszania elektronów na wytrąceniach As i P oraz defektach sieci krystalograficznej, które są obserwowane w $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$.



Rys. 1. Ruchliwość hallowska elektronów w funkcji składu dla $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$:

a/ dane z prac [2][4] ; $n = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, b/ dane z pracy [4]

Z rysunku 1b wynika ponadto, że im wyższa koncentracja elektronów, tym dla mniejszej wartości x rozpoczyna się silny spadek ruchliwości. Wyjaśnienie tego faktu tkwi w podnoszeniu się ze wzrostem koncentracji poziomu Fermiego, a co za tym idzie we wcześniejszym przechodzeniu elektronów do minimum X .

Pomiary, których wyniki przedstawiono na rys. 1, przeprowadzono na warstwach epitaksjalnych $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ o grubości dostatecznie dużej, aby można było usunąć podłoże GaAs i warstwę przejściową o zmiennym x . Gdy pomiary są dokonywane bez usunięcia warstwy przejściowej, wynikiem może być znaczny błąd w ocenie ruchliwości. Wynika to z faktu, że ruchliwość elektronów w obszarze przejściowym, szczególnie w warstwie bliskiej podłożu GaAs, jest znacznie wyższa od ruchliwości samej warstwy arsenofosorku galu - zjawisko to występuje szczególnie silnie dla $x > 0,4$. Jak widać, błąd pomiaru dokonanego bez usunięcia warstwy przejściowej jest funkcją grubości warstwy i składu x . Dla grubych warstw o składzie $x < 0,3$ błąd będzie mały, ale dla cienkich warstw z dużym x / $x > 0,4$ / może być on bardzo duży.

Koncentracja elektronów w arsenofosorku galu jest określana na ogół następującymi metodami:

- z pomiarów napięcia przebicia złącza metal-GaAs_{1-x}P_x
- z pomiarów diod Schottky'ego metodą C-V
- z pomiarów hallowskich.

Pierwsze dwie metody dają pomiar odpowiadający całkowitej koncentracji elektronów w półprzewodniku, natomiast pomiary hallowskie dają nam efektywną koncentrację, która może być nawet kilkakrotnie niższa od rzeczywistej. To zjawisko występuje oczywiście tylko w zakresie, w którym mamy do czynienia z dwoma rodzajami elektronów / $0,3 < x < 0,55$ /.

Korzystając z modelu dwupasmowego można wyrazić koncentrację hallowską jako funkcję koncentracji i ruchliwości elektronów w minimach Γ i X .

$$\frac{i}{n_H} = -e R_{H1} = e \int \mu_{H1} = \frac{n_{\Gamma} b^2 + n_x}{/n_{\Gamma} b + n_x /}^2 \quad (5)$$

Stosunek całkowitej koncentracji elektronów n_T do koncentracji określonej doświadczalnie z pomiarów Halla n_H wynosi:

$$\frac{n_T}{n_H} = \frac{n_{\Gamma} + n_x}{n_H} = \frac{f / b^2 - 1 / + 1}{/f / b - 1 / + 1 /}^2 \quad (6)$$

Jak należało się spodziewać, jeśli $f = 1 / x < 0,3$ / lub $f = 0 / x > 0,55$ / koncentracja uzyskana z pomiarów hallowskich jest równo całkowitej koncentracji elektronów. Największa rozbieżność pomiędzy całkowitą koncentracją nośników i koncentracją hallowską istnieje dla $f = 1/b+1$. Dla składu, przy którym osiągamy taką wartość parametru f , n_T/n_H osiąga wartość maksymalną $/b+1 /}^2 / 4b$. Łatwo stąd wyliczyć, że gdy $b = 30$, to $n_T/n_H = 8$. Jest to bardzo dużo rozbieżność. Wynika stąd następujący praktyczny wniosek: producent i odbiorca arsenofosorku голу o składzie $0,3 < x < 0,55$ powinni ustalić metodę pomiaru koncentracji elektronów przy atestowaniu materiału.

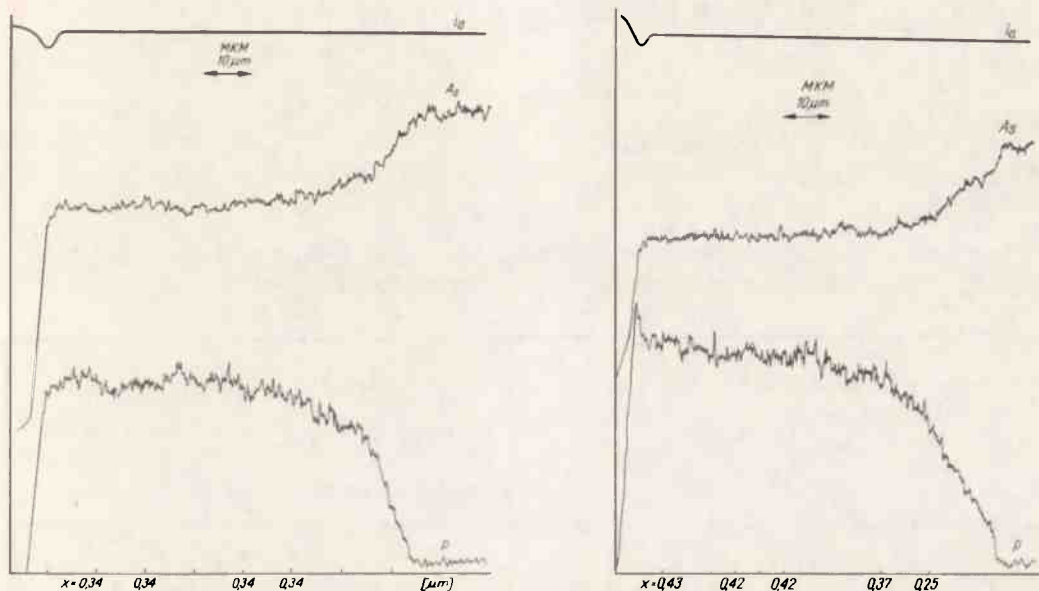
2. OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ

Pomiary parametrów hallowskich przeprowadzono na partii warstw epitaksjalnych $GaAs_{1-x}P_x$ o wartości parametru $x = 0,33 \pm 0,43$. Grubość warstwy o stałym x wahała się w granicach 20-50 μm , grubość warstwy przejściowej 10-50 μm . Wszystkie badane warstwy otrzymywano z fazy gazowej na podłożu z półizolacyjnego $GoAs$. W badanych próbkach określono wartość parametru x w głębi warstwy za pomocą mikrosondy rentgenowskiej.

Na rysunkach 2a i 2b przedstawiono typowe przebiegi rozkładu x w głębi warstwy otrzymane przy zastosowaniu mikrosondy rentgenowskiej. Pomiary parametrów hallowskich przeprowadzono metodą Van der Pauwa. Niskooporowe omowe kontakty otrzymano przez wtopienie w próżni stopu $InNi$. Temperatura wtopienia wynosiła 450-500°C.

W tabelicy 1 przedstawiono wartości parametrów elektrycznych i geometrycznych niektórych mierzonych warstw, uzyskane przez pomiar parametrów hallowskich, bez usuwania podłoża i warstwy przejściowej. Ponieważ pomiary prowadzono bez zdjęcia warstwy przejściowej, otrzymane wartości ruchliwości odbiegają od wartości rzeczywistych. Ruchliwość elektronów w warstwach 1/49/1, 1/53/1 i 1/64/1 są wyraźnie wyższe niż wynikałoby to z rys. 1b. Szczególnie jaskrawo wpływ warstwy przejściowej występuje w próbce 1/49/1, w której $\mu_H = 1440 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ przy $x = 0,41$ i koncentracji

elektronów $2,36 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Ta wartość ruchliwości jest prawie równa ruchliwości elektronów otrzymanej w warstwie 1/52/1 o składzie $x = 0,34$. Tak wysokie wartości ruchliwości w warstwach 1/49/1 i 1/64/1 można wyjaśnić szczególnie dużą grubością warstwy przejściowej w stosunku do całkowitej grubości warstwy w tych próbkach. Biorąc poprawkę na wpływ warstwy o zmiennym x i na koncentrację donorów można stwierdzić, że w zakresie $0,34 < x < 0,43$ następuje spadek ruchliwości elektronów, co jest zgodne z danymi zawartymi w literaturze [1].



Rys. 2. Zmiana składu w głąb warstwy epitaksjalnej. Obraz otrzymany przy zastosowaniu mikrosondy rentgenowskiej:

a/ warstwa epitaksjalna $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ 1/52/1, b/ warstwa epitaksjalna $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ 1/53/1

Ustalenie rzeczywistych wartości parametrów hallowskich warstw epitaksjalnych arsenofosorku galu prowadzono dwoma metodami:

1. Usunięto podłoże oraz warstwę przejściową i po wtopieniu kontaktów zmierzono parametry hallowskie warstwy. Ta metoda jest niezwykle uciążliwa ze względu na bardzo małe grubości warstw o stałym x /maksymalnie 50 μm /. Polerowanie warstwy do takiej grubości stwarza znaczne trudności z powodu dużej kruchości materiału. Bardzo trudno jest także uzyskać wymaganą do pomiarów płaskorównoległość płytki.

2. Usunięto warstwę o stałym składzie i przeprowadzono pomiary na warstwie przejściowej. Po obliczeniu parametrów hallowskich warstwy przejściowej ustalono parametry warstwy o stałym x , korzystając z następującego uproszczonego modelu. Założono, że spadek napięcia utrzymany w pomiarze na warstwie bez usunięcia warstwy przejściowej jest spadkiem napięcia na dwóch równolegle połączonych oporach /rys. 3/:

a/ oporze R_1 reprezentującym oporność właściwą warstwy o stałym x
 b/ oporze R_2 reprezentującym oporność właściwą warstwy przejściowej

$$g = Rk/d_1 + d_2/ \quad (7)$$

$$S_1 = R_1 k d_1 \quad (8)$$

$$S_2 = R_2 k d_2 \quad (9)$$

gdzie: g - oporność właściwa zmierzona na warstwie epitaksjalnej z warstwą przejściową

S_1 - oporność właściwa warstwy o stałym x

S_2 - oporność właściwa zmierzona na warstwie przejściowej

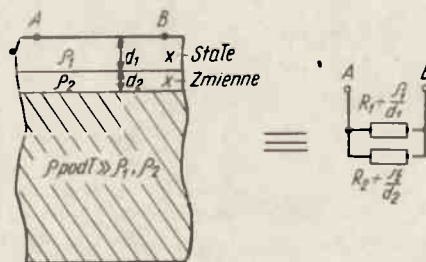
d_1 - grubość warstwy o stałym x

d_2 - grubość warstwy przejściowej.

Tablica 1

Wyniki pomiarów parametrów geometrycznych i elektrycznych warstw epitaksjalnych $GaAs_{1-x}P_x$ uzyskane bez usuwania podłoża i warstwy przejściowej

Nr próbki	Całkowita grubość warstwy / μm /	Grubość warstwy o stałym x / μm /	x	Ruchliwość hallowska / cm^2/Vs /	Koncentracja elektronów / cm^{-3} /
1/52/1	75	50	0,34	1490	$1,67 \cdot 10^{17}$
1/62/4	60	50	0,38	850	$1,40 \cdot 10^{18}$
1/63/2	90	40	0,40	815	$1,74 \cdot 10^{18}$
1/49/1	60	30	0,41	1440	$2,36 \cdot 10^{17}$
1/53/1	75	50	0,42	1210	$2,17 \cdot 10^{17}$
1/64/1	50	20	0,43	910	$8,00 \cdot 10^{17}$



Rys. 3. Schemat zastępczy oporu warstwy epitaksjalnej arsenofosorku galu wraz z warstwą przejściową i podłożem

Współczynnik proporcjonalności w równaniach (7) ÷ (9) jest taki sam, co wiąże się z założeniem, że do obydwu pomiarów kontakty wtopiono w tej samej konfiguracji.

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (10)$$

$$\text{Stąd: } S_1 = \frac{d_1 S_2}{S_2/d_1 + d_2/S_2} \quad (11)$$

Znając parametry d_1 i d_2 oraz zmierzone wartości S_1 i S_2 można obliczyć oporność właściwą warstwy o stałym x korzystając z równania (11). Ponieważ wartość stałej Halla zmierzona na całej warstwie i na samej warstwie przejściowej były we wszystkich próbkach identyczne w granicach błędu pomiarowego, można było założyć, że ten sam współczynnik Halla ma warstwa o stałym x . Umożliwiło to obliczenie ruchliwości elektronów w warstwie o stałym x .

Porównanie wyników uzyskanych obydwoma metodami na tych samych próbkach wykazało różnicę w granicach błędu wynikającego ze stosowanej aparatury. Dla porównania tych metod płytkę z warstwą epitaksjalną dzielono na dwie części.

Tabl. 2

Wyniki pomiarów parametrów elektrycznych otrzymane z uwzględnieniem oddziaływania warstwy przejściowej

Nr warstwy	x	Ruchliwość elektronów /cm ² /Vs/	Koncentracja elektronów /cm ⁻³ /	μ^*/μ
1/52/1	0,34	1300	$1,64 \cdot 10^{17}$	1,15
1/49/1	0,41	970	$2,36 \cdot 10^{17}$	1,48
1/53/1	0,42	600	$2,17 \cdot 10^{17}$	2,02

μ^* - wartość ruchliwości elektronów otrzymana dla tej samej warstwy bez uwzględnienia oddziaływania warstwy o zmiennym x .

W tabelicy 2 przedstawiono wyniki pomiarów niektórych warstw epitaksjalnych GaAs_{1-x}P_x po wyeliminowaniu wpływu warstwy przejściowej. Wartości ruchliwości, przedstawione w tej tabelicy, wykazują dużą zbieżność z wartościami z rys. 1b. Można zauważyć silny spadek ruchliwości przy wzroście x . Ponadto, ponieważ warstwy 1/52/1 i 1/53/1 mają identyczne grubości warstwy o stałym x /50 μ m/ i warstwy przejściowej /25 μ m/, można stwierdzić, jak wpływa warstwa przejściowa na mierzoną ruchliwość dla różnych wartości x . W warstwie o $x = 0,34$ nieuwzględnienie wpływu warstwy przejściowej powoduje zawyżenie ruchliwości o 15%, a w warstwie o $x = 0,42$ o 102%. Ten wynik doskonale zgadza się z rozważaniami teoretycznymi.

Tablica 3

Oszacowane wartości stosunku ruchliwości elektronów w minimach Γ i X oraz rzeczywiste wartości koncentracji elektronów.

Nr warstwy	x	μ_{Γ} / μ_x	n_{Γ} / n_H	$n_{\Gamma} / \text{cm}^{-3}$
1/52/1	0,34	13,1	1,10	$1,80 \cdot 10^{17}$
1/49/1	0,41	11,0	2,00	$4,72 \cdot 10^{17}$
1/53/1	0,42	8,9	2,13	$4,62 \cdot 10^{17}$

Dla warstw 1/52/1, 1/49/1 i 1/53/1 oszacowano, korzystając z równań (2) \div (4), stosunek ruchliwości w minimach Γ i X /przy założeniu $u_m = 100 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ / oraz przeprowadzono na podstawie równania (6) obliczenia rzeczywistej koncentracji elektronów. Wyniki przedstawiono w tabl. 3. Wartości parametru b z tabl. 3 dobrze zgadzają się z wartościami otrzymanymi w literaturze [5] - [7]. Można zauważyć, że b maleje ze wzrostem x. Jest to między innymi spowodowane wzrostem masy efektywnej elektronów w minimum Γ , a co za tym idzie zmniejszeniem ruchliwości elektronów z tego minimum. Dla $x > 0,4$, jak się spodziewano, rzeczywista wartość koncentracji elektronów różni się znacznie od koncentracji otrzymanej z pomiarów hallowskich na warstwie bez uwzględniania oddziaływania warstwy przejściowej.

3. WNIOSKI

W celu szybkiej oceny parametrów elektrycznych warstw epitaksjalnych arsenofosforu galu należy stosować płytki kontrolne z półizolacyjnego GaAs. Na warstwach osadzonych na podłożu wysokooporowym wykonuje się następnie pomiar parametrów geometrycznych /grubość warstwy o stałym x i grubość warstwy przejściowej/ oraz określa się wartość parametru x. Na podstawie znajomości składu i grubości warstwy ustala się sposób przeprowadzania pomiarów parametrów hallowskich.

Dla warstw o $x < 0,35$ i $d_2/d < 0,5$ /gdzie d - całkowita grubość warstwy epitaksjalnej, d_2 - grubość warstwy przejściowej/ można wykonywać pomiary parametrów hallowskich bez usuwania warstwy przejściowej. Błąd spowodowany nieuwzględnieniem warstwy przejściowej nie przekracza w tych warunkach 20%.

Dla warstw o $x < 0,35$ i $d_2/d > 0,5$ oraz dla warstw o składzie $x > 0,35$ przy określaniu parametrów hallowskich należy uwzględniać warstwę przejściową i przy obliczeniach stosować model dwupasmowy. Należy zauważyć, że sposób określania parametrów elektrycznych epitaksjalnej warstwy o stałym x z dwóch pomiarów /na warstwie o stałym x wraz z warstwą przejściową oraz na warstwie przejściowej/ jest szybki i wygodny. Wyniki uzyskane na płytkach kontrolnych uważa się za reprezentatywne dla całej partii płytek z danego procesu.

Literatura

1. Craford M. G.: Progress in Solid State Chemistry 8, 1973, 127
2. Tietjen J. J., Weisberg L.R., Appl. Phys. Lett. 7, 1965, 261
3. Dane Stewarta opublikowane w pracy Lees J.: Solid State Commun. 6, 1968, 11
4. Dane Grovesa W. O. opublikowane w pracy [1]
5. Craford M. G.: Phys. Rev. 168, 1968, 867
6. Jurowa E. i in.: FTP 7, 1973, 385
7. Jurowa E. i in.: FTP 6, 1972, 2093