

# WYTWARZANIE HETEROSTRUKTUR InP/InGaAs METODĄ EPITAKSJI Z FAZY GAZOWEJ Z UŻYCIEM METALOORGANIKI (MOVPE)

Agata Jasik<sup>1</sup>, Włodzimierz Strupiński<sup>1</sup>, Kamil Kosiel<sup>1</sup>

Zbadano parametry elektryczne warstw epitaksjalnych i ich zależności od ciśnienia w komorze reakcyjnej oraz temperatury procesu. Wyznaczono minimalną temperaturę, w której możliwe jest otrzymywanie bezdefektowych warstw o bardzo dobrych parametrach elektrycznych. Opanowano w szerokim zakresie technologię domieszkowania krzemem warstw dwuskładnikowych i trójskładnikowych. Zwiększono rozdzielczość kontroli niedopasowania sieciowego warstw InGaAs otrzymywanych na podłożach z fosforu indu domieszkowanego żelazem (InP:Fe). Wykonano dwa typy heterostruktur do elektronowych przyrządów niskoszumowych.

## 1. WSTĘP

Warstwy epitaksjalne  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  i InP otrzymane metodą epitaksji z fazy gazowej przy użyciu związków metaloorganicznych *metalorganic vapor phase epitaxy* (MOVPE) są szeroko stosowane do wytwarzania tranzystorów niskoszumowych, tranzystorów wysokiej częstotliwości (InAlAs/InGaAs/InP), fotodiod (p-i-n), fotodetektorów oraz struktur półprzewodnikowych takich jak supersieci (*superlayer* - SL), wielokrotne studnie kwantowe *multi quantum wells* (MQW), w których InP pełni rolę bufora, natomiast InGaAs, jako związek wąskoprzerwowy - stanowi warstwę czynną [1]. Etapem wyjściowym w technologii przyrządów półprzewodnikowych są warstwy InP i InGaAs. Parametry tych warstw zależą od wielu czynników technologicznych takich jak ciśnienie w reaktorze, temperatura wzrostu, ciśnienie cząstkowe reagentów, czystość stosowanych gazów, czystość odczynników chemicznych stosowanych przy przygotowywaniu płytek podłożowych oraz jakość struktury i powierzchni płytki [2]. Płytko podłożowa o wyższej zawartości domieszki resztkowej oraz niewłaściwie przygotowanej powierzchni staje się źródłem zanieczyszczeń i defektów strukturalnych warstwy epitaksjalnej.

Praca obejmuje zagadnienia dotyczące wzrostu nie domieszkowanych i domiesz-

---

<sup>1</sup> Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa

kowanych krzemem warstw epitaksjalnych InP, InGaAs metodą (MOCVD) *method metalorganic chemical vapor deposition* w reaktorze do epitaksji AIX-200. Jest ona kolejnym etapem optymalizacji technologii otrzymywania warstw epitaksjalnych.

Zbadano wpływ całkowitego ciśnienia w reaktorze i temperatury prowadzenia procesu na morfologię powierzchni i parametry elektryczne warstw InP oraz rozszerzono zakres domieszkowania krzemem warstw InP:Si.

Zwiększono rozdzielczość kontroli niedopasowania sieciowego ( $\Delta a/a$ ) InGaAs/InP.

Rozszerzono zakres domieszkowania krzemem warstw InGaAs:Si.

Efektom końcowym było otrzymanie heterostruktur do zastosowań w przyrządach półprzewodnikowych.

## 2. CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

Celem badań było zastosowanie metody MOCVD do wytwarzania struktur InP/InGaAs o właściwościach umożliwiających wykorzystanie jej w elektronowych przyrządach niskoszumowych. Parametry warstw takiej struktury przedstawiono poniżej:

warstwa podkontaktowa	InP : Si	$d=150 \text{ nm}$	$N_D=5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
kanał	InGaAs : S	$d=300 \text{ nm}$	$N_D=1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
bufor	nie domieszkowany InP $d = 300 \text{ nm}$		
podłoże	SI InP		

**Rys. 1.** Schematyczne przedstawienie struktury InP/InGaAs.

**Fig. 1.** Schematic figure of the InP/InGaAs structure.

W drugim wariantcie tej struktury jako warstwę przykrywającą zastosowano nie-domieszkowaną warstwę InP o grubości 30 nm.

W Zakładzie Epitaksji (ITME) przy zastosowaniu technologii otrzymywania warstw epitaksjalnych ze związków metaloorganicznych MOCVD, przeprowadzono badania mające na celu optymalizację parametrów technologicznych, wpływających na jakość warstw.

Parametry elektryczne warstw InP zależą w dużym stopniu od stanu powierzchni stosowanych podłoży. Dlatego istnieje konieczność dokładnego ich przygotowywania przed każdym procesem według opracowanej w Zakładzie receptury [13].

Umiejętność otrzymania epitaksjalnej warstwy buforowej InP o niskiej koncentracji zanieczyszczeń (domieszka niekontrolowana) i wysokiej ruchliwości jest punktem

wyjścia do prac nad wzrostem złożonych struktur wieloskładnikowych .

Homoepitaksję InP/InP:Fe przeprowadzono na płytkach 2 calowych, trawionych bezpośrednio przed procesem wg wielokrotnie przetestowanej receptury. Trawienie ma na celu usunięcie nagromadzonych na powierzchni płytki zanieczyszczeń, będących źródłem zanieczyszczeń niekontrolowanych, jak również usunięcie zdefektowanej warstwy przypowierzchniowej, powstałej w trakcie obróbki powierzchni: cięcia, polewania i szlifowania.

Jednym z głównych powodów , dla których proces epitaksji przeprowadzono pod obniżonym ciśnieniem jest możliwość zmniejszenia koncentracji aktywnych elektrycznie zanieczyszczeń i zbadanie na ile zmiany ciśnienia wpływają na ruchliwość nośników w warstwach InP. Przeprowadzono serię procesów w zakresie ciśnień od 80 do 140 mbar. Źródłem indu był trimetyloind ( TMIn), natomiast fosforu - fosforowódór ( $PH_3$ ). Procesy przeprowadzono w temperaturze 650°C. Czystość warstw oceniano na podstawie wyników pomiaru ruchliwości i koncentracji nośników metodą Hall'a oraz za pomocą badań fotoluminescencji. Wyniki zebrano i przedstawiono w Tab.1 i na Rys.2.

Następnym parametrem odgrywającym bardzo ważną rolę w procesie otrzymywania warstw epitaksjalnych jest temperatura. Wpływa ona na szybkość osadzania, jakość strukturalną warstw epitaksjalnych i parametry elektryczne. W ramach niniejszej pracy przebadany został wpływ temperatury na wielkość parametrów elektrycznych warstw homoepitaksjalnych InP przy zachowaniu pozostałych parametrów procesu. Temperaturę zmieniano w przedziale od 635°C do 685°C, natomiast ciśnienie w reaktorze pozostawiono stałe, równe 100 mbar. Rezultaty serii eksperymentów zamieszczono w Tab. 2 i na Rys.3.

Kolejnym krokiem w kierunku wykonania ww. heterostruktury było opanowanie techniki osadzania warstw o ściśle określonej koncentracji nośników. Jako domieszkę donorową zastosowano krzem, którego prekursorem był silan. Wykonano szereg procesów znalezienia zależności między ciśnieniem cząstkowym silanu w komorze reakcyjnej, przepływami gazów a koncentracją nośników w warstwie. Koncentrację mierzono głównie metodą Hall'a i w oparciu o uzyskane wyniki wykreślono krzywą zależności wbudowywanej domieszki od ciśnienia parcjalego prekursora tej domieszki w reaktorze. Uzyskano możliwość otrzymywania epitaksjalnych warstw InP domieszkowanych w zakresie od  $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$  do  $2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ .

Dalsze badania prowadzono nad warstwami trójskładnikowymi  $In_xGa_{1-x}As$ . Warstwy InGaAs hodowano na podłożach półizolacyjnych InP:Fe stosując TMIn, TMGa, AsH<sub>3</sub>. Możliwe jest otrzymanie warstw InGaAs o różnym składzie chemicznym (różnych x). Celem tej pracy było otrzymanie warstwy o sieci krystalicznej dopasowanej do podłoża, InGaAs o parametrze sieci zbliżonym do parametru sieci podłoża InP (5,87Å) ma skład: 46,8% Ga, 53,2% In. Odchylenie od tego składu o 1% jest dopuszczalne, warstwy nie mają mikropęknięć i dyslokacji niedopasowania. W pracy przeprowadzono próby dobrania takiego składu atmosfery w reaktorze, aby możliwy był

jednorodny wzrost dopasowanej warstwy InGaAs na całej powierzchni 2 calowej płytki InP:Fe. Zbadano wpływ ciśnienia cząstkowego TMI<sub>n</sub> i stosunku ciśnień cząstkowych reagentów grupy V do grupy III. Do oceny współczynnika niedopasowania użyto metody dyfrakcji rentgenowskiej.

W celu precyzyjnej kontroli niedopasowania sieci krystalicznej warstwy InGaAs do sieci podłoża InP przeprowadzono serię procesów przy stałym ciśnieniu całkowitym w reaktorze, temperaturze 650°C i stałych przepływach gazów: TMGa, AsH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>. Wprowadzano zmiany przepływu TMI<sub>n</sub>, zmieniając tym samym ciśnienie cząstkowe tego związku w komorze reakcyjnej. Na podstawie serii procesów określono optymalne warunki ciśnieniowe i temperaturowe otrzymywania dopasowanych sieciowo warstw InGaAs/InP:Fe i dobrano odpowiednie przepływy prekursorów gazowych. Najbardziej znacząca jest szybkość przepływu gazu nośnego przez pojemniki zawierające prekursorzy związków metaloorganicznych (utrzymywane w odpowiednich temperaturach). Szybkość ta determinuje prężność par tych związków w reaktorze.

Wykonanie żądanej heterostruktury jest związane z odpowiednim domieszkowaniem dopasowanych sieciowo warstw InGaAs. Zakres wprowadzanej koncentracji domieszki ( $\sim 5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ , przy całkowitej koncentracji atomów w ciele stałym  $\sim 10^{22} \text{cm}^{-3}$ ) nie powoduje istotnej zmiany parametru sieci krystalicznej, co stwierdzono na podstawie pomiarów rentgenowskich.

Precyzyjne domieszkowanie wymaga znalezienia korelacji między ciśnieniem cząstkowym silanu w reaktorze, przepływami gazu, a koncentracją nośników w warstwie, przy zachowaniu pozostałych parametrów procesu. Koncentracja nośników mierzona była metodą Hall'a, wybiórczo potwierdzana pomiarem (ECV) *elektrochemicznej charakterystyki CV* na urządzeniu z sondą trawiącą Polaron oraz klasyczną metodą pomiaru C-V, z użyciem sondy rtęciowej.

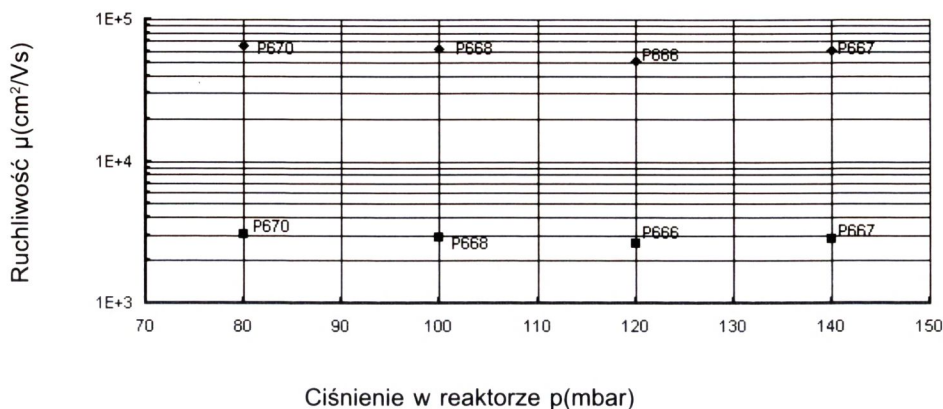
Ostatecznym etapem niniejszej pracy było wykonanie heterostruktur o wyżej podanych parametrach, według określonych, opracowanych do tego celu procedurach technologicznych.

Przed każdym procesem epitaksji płytka podłożowa była poddawana trawieniu i myciu, w celu usunięcia zanieczyszczeń, zarówno pochodzenia organicznego jak i nieorganicznego oraz warstwy przypowierzchniowej, zdeformowanej na skutek ostatecznej obróbki mechanicznej.

Podczas przygotowywania procedur zadbano o to, aby czas osadzania kolejnych warstw w odpowiednich strukturach, gwarantował otrzymanie warstw o planowanej grubości. Szybkość wzrostu InP i InGaAs ustalono za pomocą mikroskopu skaningowego i optycznego dzięki pomiarom wytrawionych przełamów warstw epitaksjalnych. Kolejnym istotnym problemem jest minimalizacja grubości obszaru przejściowego między kolejnymi warstwami (interface). Obszary te o nieznanym składzie, zmiennym w funkcji grubości, pogarszają jakość przyrządów wytwarzanych na bazie wspomnianych struktur, przede wszystkim oddziałując na parametry transportu nośników. Przy projektowaniu procesów, wprowadzono taki czas zatrzymania wzrostu kryształu i przełączania przepływu gazów, aby zminimalizować grubość obszarów granicznych.

### 3. DYSKUSJA WYNIKÓW

Wpływ zmian ciśnienia w reaktorze na parametry elektryczne warstwy InP przedstawiono na Rys.2 (zależność ruchliwości od ciśnienia w reaktorze) i w Tab. 1.



**Rys. 2.** Zależność ruchliwości nośników w warstwie InP od ciśnienia w reaktorze w temperaturze procesu  $T=650^{\circ}\text{C}$ . ■ - pomiar metodą Hall'a w temperaturze 300K, ◆ - pomiar metodą Hall'a w temperaturze 77K.

**Fig. 2.** Influence of the reactor pressure on the carrier mobility; ■ - at the temperature 300K, ◆ - at the temperature 77K.

**Tabela 1.** Zależność parametrów elektrycznych od ciśnienia w reaktorze.

**Table 1.** Influence of the electrical parameters on the reactor pressure.

N r P	p(reaktor m bar)	$\mu_{77\text{K}}$ (cm <sup>2</sup> /V s)	$\mu_{300\text{K}}$ (cm <sup>2</sup> /V s)	$n_{77\text{K}}$ (cm <sup>-3</sup> )	$n_{300\text{K}}$ (cm <sup>-3</sup> )
670	80	65984	3094	1,63 E+14	3,50 E+14
668	100	62757	2885	2,27 E+14	1,10 E+15
666	120	51435	2622	2,49 E+14	1,44 E+15
667	140	60582	2864	1,89 E+14	5,84 E+14

μ - ruchliwość elektronów, cm<sup>2</sup>/Vs;

n - koncentracja elektronów, cm<sup>-3</sup>;

T - temperatura procesu.

Parametry elektryczne bardzo słabo zależą od ciśnienia w reaktorze w zakresie <80-140> mbar. Najczęściej spotykane dane literaturowe dotyczą warstw otrzymywanych przy ciśnieniu atmosferycznym lub dziesięciokrotnie niższym [2]. Głównym zagrożeniem dla czystości warstw InP w temperaturze osadzania 650°C, są domieszki

donorowe, szczególnie krzem [2]. Przede wszystkim pochodzi on z zanieczyszczonych prekursorów metaloorganicznych. Zmniejszenie ciśnienia powoduje zmniejszenie prawdopodobieństwa zderzeń skutecznych, prowadzących do rozpadu silanu na mniej lotne związki, tym samym, zmniejszenie ilości domieszki, mogącej się wbudować w rosnącą warstwę. Wynika stąd wniosek, że dopiero przy tak dużej różnicy ciśnień (ponad rząd wielkości) zauważalna jest poprawa parametrów elektrycznych. Prowadzona była również obserwacja stanu powierzchni warstw pochodzących z kolejnych procesów. Stwierdzono, że zmiany całkowitego ciśnienia nie wpływają na morfologię powierzchni, powodując jedynie zmiany szybkości osadzania.

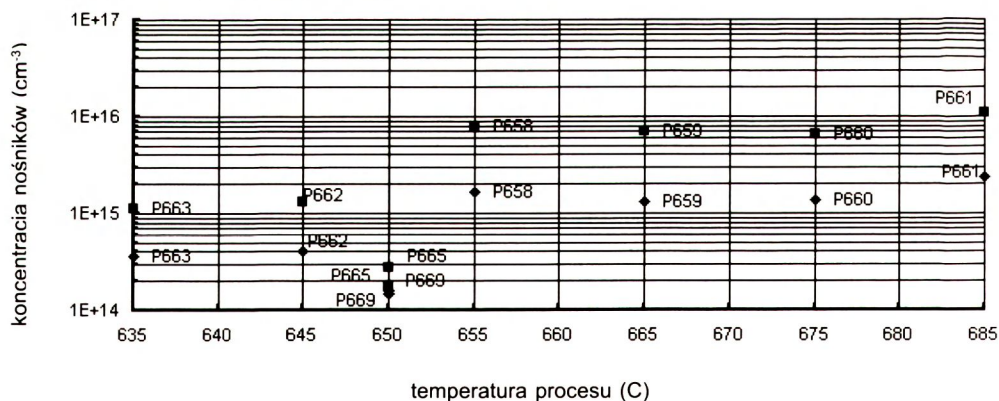
Wyniki serii eksperymentów, gdzie zmiennym parametrem była temperatura przedstawiono w Tab. 2 i na Rys.3.

**Tabela 2.** Zależność parametrów elektrycznych od temperatury podłoża.

**Table 2.** Influence of the electrical parameters on the substrate temperature.

NR P	T(°C)	$\mu_{77K}(\text{cm}^2/\text{Vs})$	$\mu_{300K}(\text{cm}^2/\text{Vs})$	$n_{77K}(\text{cm}^{-3})$	$n_{300K}(\text{cm}^{-3})$
663	635	57499	2915	3,57E+14	1,12E+15
662	645	55088	2856	4,07E+14	1,34E+15
665	650	67880	3509	1,47E+14	2,78E+14
658	655	33865	2292	1,69E+15	7,90E+15
659	665	34275	2194	1,31E+15	7,14E+15
660	675	30199	2204	1,38E+15	6,63E+15
661	685	20074	2385	2,37E+15	1,08E+16

$\mu$  - ruchliwość elektronów,  $\text{cm}^2/\text{Vs}$ ;  
 $n$  - koncentracja elektronów,  $\text{cm}^{-3}$ ;



**Rys. 3.** Zależność koncentracji nośników w warstwie InP od temperatury procesu, ■ - w temperaturze 300K, ◆ - w temperaturze 77K.

**Fig. 3.** Influence the process temperature in InP epilayer, on the carrier concentration, ■ - at the temperature 300K, ◆ - at the temperature 77K.

Z przytoczonych danych wynika, iż zależność parametrów elektrycznych od temperatury procesu jest nieliniowa i posiada ekstremum. Powodem jest aktywowany płytką podłożową przebieg procesu, podczas którego reakcje prowadzące do powstania monokrystalicznej warstwy mają charakter endotermiczny, czyli uzależnione są od dostarczanego ciepła. Minimum koncentracji, a maksimum ruchliwości znajduje się w pobliżu temperatury 650°C. Dążąc do jak najwyższej ruchliwości, obniżano temperaturę wzrostu, ale obserwacja powierzchni warstw za pomocą mikroskopu optycznego po każdym procesie epitaksjalnym, pozwoliła stwierdzić, że przy  $T = 645^\circ\text{C}$  pojawiają się nieliczne błędy wzrostu. Zaobserwowane defekty powstały na skutek spowolnienia reakcji pirolizy prekursorów, a tym samym zaburzenia stosunku ciśnień pierwiastków grupy V do grupy III, przy którym zachowany jest monokrystaliczny wzrost warstwy.

Biorąc za kryterium oceny jakości warstw InP, parametry elektryczne i morfologię powierzchni, określono optymalne warunki do dalszych badań i prac z fosforem indu: ciśnienie całkowite w reaktorze 100 mbar, temperatura procesu  $T = 650^\circ\text{C}$ . Wielkości te, przy zastosowaniu prekursorów klasycznych, są najczęściej stosowane przez technologów[2, 5-6].

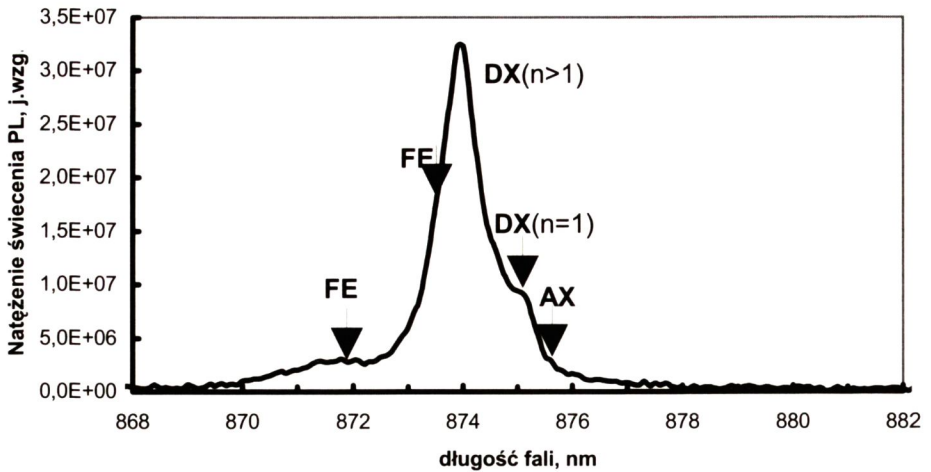
Dla cienkich warstw InP:  $d = 1,5 \div 2,5 \mu\text{m}$  najlepszym rezultatem ruchliwości jest  $\mu_{77\text{K}} = 70000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  przy koncentracji nośników  $n_{77\text{K}} = 1,16 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  w temperaturze pomiaru  $T = 77 \text{ K}$ . Wielkości te zostały otrzymane w warstwie spełniającej warunki aplikacyjności, tj. o dobrej strukturze krystalograficznej i morfologii powierzchni. Dla porównania, można zacytować przykładowe dane literaturowe (cienkie warstwy InP):  $d = 2,5 \mu\text{m}$ ,  $\mu_{77\text{K}} = 59800 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ,  $n_{77\text{K}} = 1,5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  [5].

W przypadku grubych warstw InP:  $d = 14 \mu\text{m}$  ruchliwość osiągnęła wartość  $\mu_{77\text{K}} = 164508 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  przy koncentracji  $n_{77\text{K}} = 2,46 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ , zaś przy  $\mu_{300\text{K}} = 4047 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ;  $n_{300\text{K}} = 3,51 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ . Maksymalna ruchliwość mierzona metodą Hall'a przy  $T = 50 \text{ K}$  wynosi  $\mu_{50\text{K}} = 205000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ , przy czym literaturowe dane dla porównywalnej grubości warstwy  $d = 10 \mu\text{m}$  to  $\mu_{77\text{K}} = 200\,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  [1].

Potwierdzeniem dobrej jakości strukturalnej warstw są wyniki badań fotoluminescencji przedstawione na Rys. 4 i 5, odpowiednio dla warstwy cienkiej i grubej.

W widmie brak pików pochodzącego od niezwiązanej domieszki: akceptorowej i donorowej. Dominuje pik pochodzący od ekscytonów związanych z domieszką donorową. Źródłem zanieczyszczeń donorowych może być powierzchnia płytki podłożowej, zanieczyszczone prekursorzy gr.III, gaz nośny ( $\text{H}_2$ ), gaz płuczący ( $\text{N}_2$ ). Podczas procesu epitaksji zanieczyszczenia (np.:Si,S) dyfundują z przypowierzchniowej warstwy płytki podłożowej do rosnącej warstwy epitaksjalnej i wbudowują się do odpowiedniej podsieci.

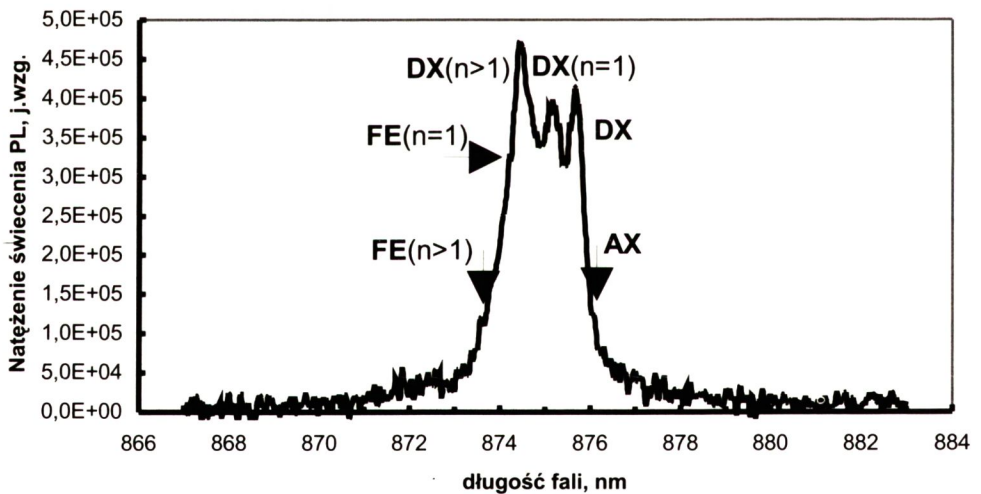
Głównym źródłem zanieczyszczeń akceptorowych jest trimetyloind, który zawiera węgiel w grupach metylowych. Na skutek pirolizy molekuł TMIIn odłączają się wolne rodniki metylowe ( $\text{CH}_3$ ). Niekontrolowana domieszka akceptorowa pochodzi również z podłoża, są to przede wszystkim węgiel (C) i cynk (Zn).



Rys. 4. Widmo PL warstwy InP 669,  $T = 6$  K, intens. wzbudzenia  $0,92$  W/cm<sup>2</sup>.

Fig. 4. Photoluminescence spectra of InP 669,  $T = 6$  K.

Na Rys.5 przedstawiono widmo PL dla warstwy grubej,  $d=14$   $\mu$ m.



Rys. 5. Widmo PL InP 703 intens. wzbudzenia  $0,05$  W/cm<sup>2</sup>,  $T = 6$  K.

Fig. 5. Photoluminescence spectrum of InP 703,  $T = 6$  K.



Na podstawie charakteru widma można powiedzieć, że warstwa zawiera małą ilość zanieczyszczeń ( $DX/AX$ , obecność ekscytonów swobodnych). Pik fotoluminescencyjny jest stosunkowo szeroki, prawdopodobnie przyczyna tkwi w jakości strukturalnej warstwy. Potwierdzeniem tego wydaje się być obecność swobodnych ekscytonów. Deformacja sieci występująca na granicy z podłożem, wprowadza naprężenia oddziaływujące na ekscyton, nie powodując jego rozpadu. Widoczny jest pik pochodzący od akceptorowej domieszki - głównym jej źródłem było podłoże.

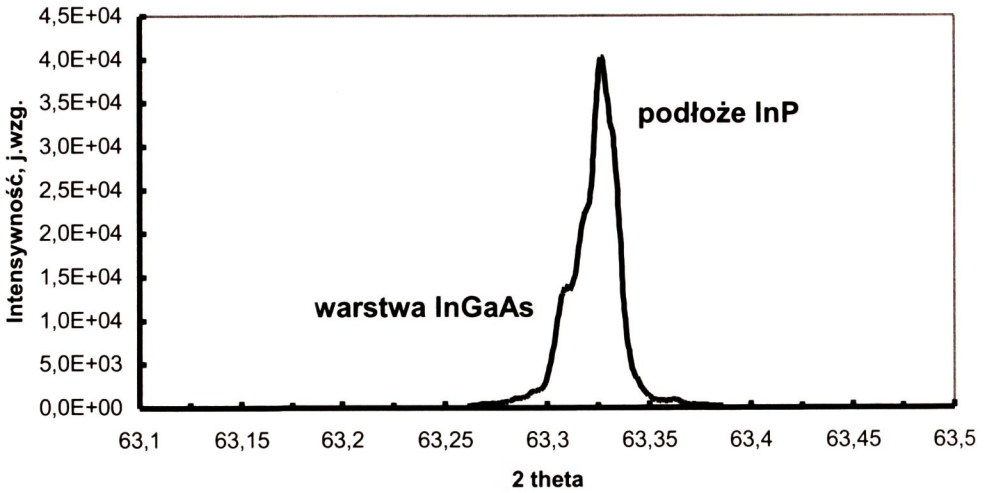
W celu otrzymania przewodnictwa typu elektronowego o wysokiej koncentracji nośników wykonano szereg procesów mających na celu znalezienie zależności między ciśnieniem cząstkowym silanu w komorze reakcyjnej, przepływami gazów, a koncentracją nośników w warstwie. Koncentrację mierzono głównie metodą Hall'a i w oparciu o dane uzyskane na tej drodze, poszerzono zakres kontrolowanego domieszkowania warstw InP krzemem. Na podstawie wykonanych procesów, widać, że można otrzymywać warstwy InP:Si o koncentracji z zakresu od  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  do  $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . Nie określono, jaka część wprowadzanej domieszki zachowuje się elektrycznie obojętnie.

Potwierdzeniem wyników pomiarów metodą Hall'a, są wybiórczo wykonane pomiary koncentracji dwoma innymi technikami pomiarowymi: ECV na urządzeniu Polaron i metodą C-V z użyciem sondy rtęciowej. Przeprowadzono również próby domieszkowania w wyższej temperaturze, tj.  $T = 655^\circ\text{C}$ . Stwierdzono, że taki sam poziom domieszkowania krzemem fosforu indu można osiągnąć stosując mniejsze ciśnienie cząstkowe silanu w reaktorze i wyższą temperaturę procesu. Zjawisko można wytłumaczyć tym, że ze wzrostem temperatury rośnie łatwość wbudowywania się domieszki donorowej do warstwy (piroliza  $\text{SiH}_4$ ).

W przypadku związków trójskładnikowych InGaAs jakość warstw kontrolowano dzięki wysokorozdzielczej dyfrakcji rentgenowskiej (niedopasowanie sieciowe) i metodą Hall'a (własności elektryczne). Wykonane prace technologiczne umożliwiły kontrolę niedopasowania sieciowego z dokładnością do 50 ppm. Na Rys.6 przedstawiono rentgenogram warstwy o składzie  $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$  i stałej sieci w przybliżeniu równej stałej sieci podłoża  $a = 5,87 \text{ \AA}$  ( $\Delta a/a \approx 0 \text{ ppm}$ ).

W zależności od typu naprężeń, pik pochodzący od warstwy znajduje się po stronie piku od podłoża. W przypadku, gdy warstwa jest bogata w ind, pik od warstwy znajduje się po stronie niskokątowej, stała sieci warstwy jest większa od stałej sieci podłoża, w warstwie występują naprężenia ściskające. W przeciwnym przypadku, gdy pik od warstwy jest po stronie wysokokątowej, oznacza to, że warstwa jest uboga w ind i naprężenia mają charakter rozciągający.

Szerokość połówkowa piku dyfrakcyjnego jest wskaźnikiem jakości strukturalnej warstwy. Im węższy pik, tym jakość warstwy lepsza, pod warunkiem, że grubość porównywanych warstw się nie zmienia. Szerokość połówkowa pików dyfrakcyjnych warstw otrzymywanych w ITME jest rzędu 26", przy czym najlepszy literaturowy rezultat wynosi 20".



**Rys. 6.** Pomiar metodą dyfrakcji rentgenowskiej warstwy InGaAs na InP:Fe ( $\Delta a/a \approx 0$  ppm).

**Fig. 6.** X-ray diffraction curve of InGaAs on InP:Fe ( $\Delta a/a \approx 0$  ppm).

Równoległe z kontrolą niedopasowania, poddano analizie zawartość domieszki nie kontrolowanej w warstwach epitaksjalnych. Pomiarów wykonywano metodą Hall'a. Przy grubości warstwy  $d = 2 \mu\text{m}$ , ruchliwość wynosi  $\mu_{77\text{K}} = 79600 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ , a koncentracja  $n_{77\text{K}} = 1,22 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ , zaś przy  $\mu_{300\text{K}} = 7272 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ,  $n_{300\text{K}} = 2,02 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ , co na tle danych w literaturze [5], [6] jest zadowalającym wynikiem.

#### 4. PODSUMOWANIE

1. Zależność ruchliwości i koncentracji nośników ładunku w nie domieszkowanych warstwach InP/InP:Fe od ciśnienia całkowitego w komorze reakcyjnej jest słabą funkcją liniową w zakresie ciśnień od 70 mbar do 150 mbar.

2. Zależności parametrów elektrycznych nie domieszkowanych warstw epitaksjalnych InP od temperatury procesu odbiega od liniowości, posiada ekstremum dla  $T = 650^\circ\text{C}$  (maksimum dla ruchliwości nośników i minimum dla ich koncentracji).

3. Wyznaczono dolną granicę temperaturową otrzymywania warstw o dobrej morfologii powierzchni ( $T = 650^\circ\text{C}$ ).

4. Otrzymano warstwy nie domieszkowane InP o grubości  $d = 14 \mu\text{m}$ , charakteryzujące się bardzo wysoką ruchliwością nośników i niską koncentracją zanieczyszczeń:  $n_{77\text{K}} = 2,5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\mu_{77\text{K}} = 164,508 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ , ( $\mu_{\text{max}} = 250,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ).

5. Rozszerzono przedział domieszkowania warstw InP: od  $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$  do  $2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ . Taki sam poziom domieszkowania fosforu indu krzemem można osiągnąć przy mniejszym ciśnieniu cząstkowym silanu w komorze reaktora, stosując wyższą temperaturę procesu.

6. Otrzymano w sposób powtarzalny warstwy InGaAs na podłożu InP z niedopasowaniem sieciowym  $\Delta a/a \approx 0$ .

7. Rozszerzono przedział domieszkowania warstw InGaAs: od  $7 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$  do  $3 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ .

8. Wykonano heterostruktury, o podanych wyżej parametrach do zastosowań w niskoszumowych przyrządach półprzewodnikowych.

W trakcie realizacji prac ujawnił się szereg problemów, których rozwiązanie przyczyniłoby się do poprawy doskonałości strukturalnej warstw. Jednym z nich jest sprawa obszarów przejściowych między kolejnymi warstwami w heterostrukturach, tj. ostrości interfejsów.

Kolejnym problemem jest czystość nie domieszkowanych warstw, a szczególnie koncentracja akceptorów, malejąca w funkcji temperatury procesu. Z literatury wiadomo, iż zależność ta jest wyraźnie widoczna podczas badań fotoluminescencji. Oba te tematy zasługują na uwagę i opracowanie.

Autorzy artykułu składają podziękowania kolegom bez pomocy których powstanie niniejszej pracy byłoby niemożliwe:

- mgr inż. M. Piersie za pomiary parametrów elektrycznych warstw epitak-sjalnych metodą Hall'a,

mgr B. Surmie za pomiary fotoluminescencji,

dr dr. J. Sassowi, M. Wójcikowi, J. Gacy za pomiary rentgenowskie.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Herman M.A.: Heterozłącza półprzewodnikowe. Warszawa: PWN, 1987; 336-375
- [2] Stringfellow G.B.: Organometallic vapour-phase epitaxy: theory and practice, Departments of Materials Science and Engineering and Electrical Engineering, Univ. of Utah 1996
- [3] Sorokin V.S.: Metody formirovanja poluprovodnikovyyh svjehrješetok i kvantovo-razmier-nyh struktur. St. Peterburg, 1996, 2, 68-91, 4, 123-143
- [4] Sangwal K.: Wzrost kryształów. Lublin, 1987
- [5] Jones A.C.: Metalorganic precursors for vapour phase epitaxy. Journal of Crystal Growth, 1992, 121, 500-506
- [6] Razeghi M.: InGaAsP-InP for photonic and electronic applications. Laboratoire Central de Recherches 3, 69-99

- [7] Bugajski M.: Spektroskopia centrów izoelektronowych w półprzewodnikach A<sup>III</sup>B<sup>V</sup>. Warszawa: PWN, 1984
- [8] Pankove J.I.: Zjawiska optyczne w półprzewodnikach. Warszawa: WNT, 1974
- [9] Surma B.: Analiza widm luminescencyjnych warstw epitaksjalnych otrzymanywanych metoda MOCVD. Warszawa: ITME 1995, raport z pracy naukowo-badawczej
- [10] Knorr C.: Carrier transport in an InGaAs(P)/InP all-optical switching structure. Journal of Crystal Growth, 1998, 182, 203-210
- [11] Hsu C.C.: Spiral growth of InP by metalorganic vapor phase epitaxy. Appl. Phys. Lett. 65(11), 1994, 1394-1396
- [12] Hamoudi A.: An optical study of interdiffusion in strained InP-based heterostructures. Appl. Phys. 71(8), 1992, 3893-3903
- [13] Strupiński W.: informacje ustne

## **InGaAs/InP HETEROSTRUCTURES MADE USING METALORGANIC VAPOR PHASE EPITAXY**

### **SUMMARY**

The dependence of epilayers electric parameters on total pressure and reactor temperature was investigated. The minimal temperature, at which very good quality layers - it means without defects, with very satisfying electric parameters - may be obtained was determined as well. The Si doping technology for binary compound and ternary melts was elaborated in a wide range. Lattice mismatch control resolution for In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As layers on InP: Fe substrate was improved. Two types of heterostructure for low noise devices were made.