

# Pomiar rozkładu fosforu w warstwach epitaksjalnych $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ w oparciu o efekt fotowoltaiczny

## 1. WSTĘP

$\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$  jest jednym z najważniejszych materiałów półprzewodnikowych stosowanych w emiterach optoelektronicznych. Używany jest najczęściej w postaci warstw epitaksjalnych osadzonych na podłożu GaAs.

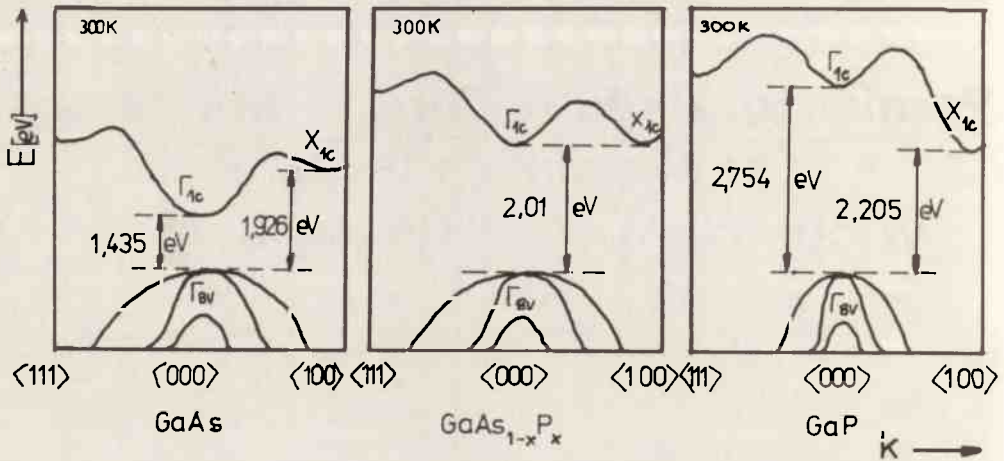
Praca dotyczy nowej metody określania współczynnika "x" w warstwach epitaksjalnych  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ , w oparciu o efekt fotowoltaiczny. Metoda ta pozwala określać ilościowe zmiany ułamka molowego fosforu na powierzchni oraz jego rozkład w głąb warstw epitaksjalnych. Znajomość tego ma istotny wpływ na opracowanie, wdrożenie i kontrolę technologii otrzymywania

$\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ . Opracowana metoda ułatwi i przyspieszy bieżącą kontrolę wytwarzanych warstw.

## 2. STRUKTURA PASMOWA $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$

Arsenofosforek galu należy do grupy materiałów o największych perspektywach zastosowania w masowej produkcji przyrządów optoelektronicznych. Materiał ten, przeznaczony na źródła promieniowania koherentnego i niekoherentnego, stosowany jest tylko w postaci warstw epitaksjalnych. Możliwość regulacji w  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$  w sposób ciągły szerokości przerwy energetycznej pozwala na konstrukcję diod świecących w obszarze widzialnym: od  $6500\text{\AA}$  -  $5500\text{\AA}$ . Wydajność kwantowa gwałtownie maleje w obszarze przejściowym  $x = 0,466$  w 300 K/ z powodu tego, że w materiale ze skośną przerwą energetyczną przejścia typu pasmo-pasmo, dominujące w materiale z prostą przerwą energetyczną, są zabronione. Szerokość jego przerwy energetycznej  $E_g$  w funkcji zawartości fosforu zależy od zmian odległości dwóch

najniższych minimów w paśmie przewodnictwa,  $\Gamma_{1c}$  i  $X_{1c}$ , od najwyższego maksimum w paśmie walencyjnym  $\Gamma_{8v}$  /rys. 1/ [12, 13].



Rys. 1. Uproszczony schemat struktury pasmowej  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$  dla:  
 a/  $x = 0$  /GaAs/,  
 b/  $x = 0,465$  /GaAs<sub>0,535</sub>P<sub>0,465</sub>/,  
 c/  $x = 1$  /GaP/

W wielu laboratoriach na świecie określono na podstawie pomiarów rentgenowskich, absorpcji optycznej, elektroodbiicia, luminescencji itd. empiryczną zależność odległości minimów  $\Gamma_{1c}$  i  $X_{1c}$  od wierzchołka pasma walencyjnego w funkcji składu "x" [1, 2, 3]. We wszystkich przypadkach zależność  $E_g = f/x$  jest funkcją kwadratową i może być bardzo dobrze dopasowana do równania:

$$E_g = A + Bx + Cx^2 \quad /1/$$

gdzie: x - ułamek molowy fosforu,

A - przerwa energetyczna GaAs,

D = A + B + C - przerwa energetyczna GaP,

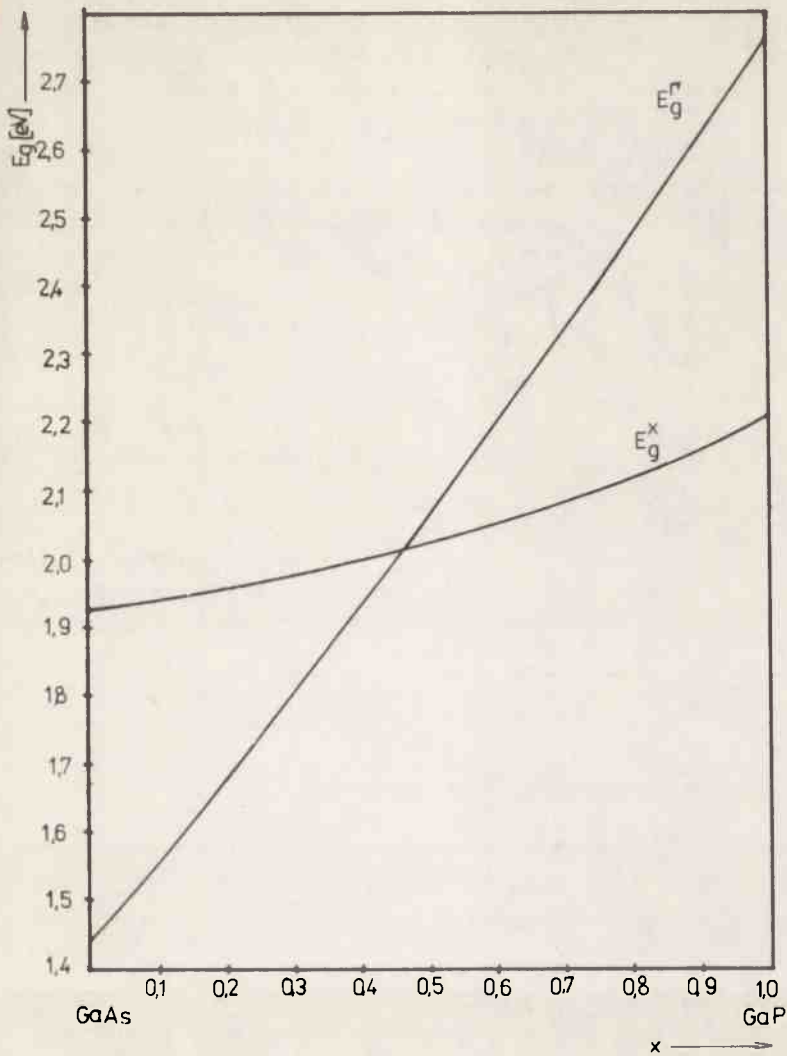
C =  $0,3 E_{cm}^{-0,5}$  - zależność empiryczna,

$E_{om}$  - średnia energia wzbroniona GaAs i GaP.

Ostatnie badania rentgenowskie pozwoliły określić bardzo dokładnie szerokość przerw energetycznych w GaAs i GaP, co pozwoliło otrzymać następujące zależności słuszne dla temperatury 300 K:

$$E_g^{\Gamma} = 1,435 + 1,166x + 0,153x^2,$$

$$E_g^X = 1,923 + 0,105x + 0,177x^2. \quad /2/$$



Rys. 2. Zmiany przerwy energetycznej w  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$  w funkcji współczynnika "x" dla przejść prostych i skośnych

Na rys. 2 przedstawiono krzywe, obrazujące zależności zmiany przerwy energetycznej w funkcji współczynnika "x" dla przejść prostych i skośnych. Krzywe te wykreślono na podstawie zależności /2/.

Wartość przerwy energetycznej w  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$  jest kombinacją funkcji /1/ taką, że:

$$E_g = \min \left\{ E_g^\Gamma/x/, E_g^X/x/ \right\}. \quad /3/$$

Dla  $x = 0$  /tzn. dla GaAs/ w temperaturze 300 K /rys. 1a/ odległości energetyczne równają się odpowiednio:  $E_g^\Gamma = \Gamma_c - \Gamma_{0V} = 1,435 \text{ eV}$  i  $E_g^X =$

$E_g = E_{gV} = 1,923 \text{ eV}$ . W GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub> wartość przerwy energetycznej  $E_g^I$  dla przejść prostych wzrasta sztywniej ze wzrostem koncentracji fosforu niż dla przejść skośnych. W wyniku tego dla  $x = 1$  /tzn. GaP/ przerwy energetyczne równają się odpowiednio:  $E_g^I = 2,754 \text{ eV}$  i  $E_g^X = 2,205 \text{ eV}$  /rys. 1c/. Ponieważ dla  $x = 0$  niższym minimum w pasmie przewodnictwa jest  $\Gamma$ , a dla  $x = 1$  niższym minimum jest X, natomiast funkcje /4/ są ciągłe w przedziale  $x \in [0,1]$ , istnieje taka wartość "x", dla której funkcje przyjmują tę samą wartość /rys. 1b/. Obydwie przerwy mają tę samą wartość  $E_g = 2,01 \text{ eV}$  dla  $x = 0,465$ . Tak więc dla GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub> w temperaturze 300 K, dla  $0 < x < 0,465$  dominują przejścia proste, a dla  $0,465 < x < 1$  skośne.

### 3. METODY OKREŚLANIA ZAWARTOŚCI FOSFORU W WARSTWACH GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub> ORAZ ICH CHARAKTERYSTYKA

Metody określania składu związków grupy A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> opisano w pracach [1-11]. Bezpośredniego pomiaru udziału molowego fosforu w GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub> dokonuje się metodami dyfrakcji rentgenowskiej [3,10] i mikroanalizy rentgenowskiej [1]. Istnieją także metody pośrednie, umożliwiające wyznaczanie ułamka molowego fosforu w GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub>. Najczęściej oparte są one na pomiarach fotoluminescencyjnych i efektu fotowoltaicznego [7,9,11].

#### 3.1. Dyfrakcja rentgenowska

W dyfrakcji rentgenowskiej bazuje się na precyzyjnym pomiarze stałej sieciowej, a udział molowy fosforu "x" określa się z zależności Vegarda [11]. Rubinstein [5] za pomocą metody proszkowej potwierdził, że układ GaAs - GaP podlega regule Vegarda, tzn. stała sieci "a" zmienia się liniowo z zawartością fosforu "x" zgodnie z równaniem:

$$a = 3,56502 - 0,2023x \text{ \AA} \quad /4/$$

Równanie to spełnione jest z dużą dokładnością [ $\approx 0,0004 \text{ \AA}$ ] dla  $0,1 < x < 0,9$ . Dla "x" spoza tego przedziału dokładność jest mniejsza i zależy od wielkości tego współczynnika.

Metoda ta wymaga jednak materiału o odpowiedniej orientacji i odpowiedniego przygotowania próbek, wymaga także znacznych nakładów aparaturowych i długiego czasu pomiarów. Z tych powodów metoda dyfrakcji rentgenowskiej jest niewygodna do pomiarów masowych. Niemniej jednak jako bardzo dokładna metoda bezpośredniego pomiaru współczynnika "x" stosowana jest do kalibrowania metod pośrednich.

### 3.2. Mikroanaliza rentgenowska

Mikroanaliza rentgenowska pozwala określić jakościowe i ilościowe zmiany koncentracji składników na powierzchni oraz w głębi warstwy epitaksjalnej  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ . Współczynnik udziału molowego fosforu w  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$  wyznacza się ze znajomości zawartości wagowej arsenu, poprzez pomiar intensywności promieniowania charakterystycznego  $\text{AsK}_{\alpha 1}$ . Jako wzorce stosuje się: metaliczny As /99,9% wag/ i stechiometryczny GaAs. Otrzymany stosunek mierzonych natężeń względnych poddaje się obliczeniom korekcyjnym, uwzględniając poprawki na absorpcję i czynnik atomowy. Uzyskana po korekcji wagowa zawartość As pozwala na obliczenie współczynnika "x" ze wzoru:

$$x = \frac{A_{\text{As}} / 100 - y / - A_{\text{Ga}} y}{A_{\text{As}} / 100 - y / + A_{\text{P}} y} \quad /5/$$

gdzie: y - zawartość As w procentach wagowych,

A - średnia masa atomowa odpowiedniego pierwiastka.

Oszacowana dokładność w określeniu "x" tą metodą wynosi  $\pm 2\%$ . Metoda ta wymaga znacznych nakładów aparaturowych oraz dokładnej znajomości stałych materiałowych do absolutnego przecechowania i z tego powodu jest zbyt droga do masowych pomiarów.

### 3.3. Fotoluminescencja

Udział molowy fosforu w  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$  może być także określony z pomiarów luminescencyjnych. Z energetycznego położenia maksimum intensywności świecenia luminescencyjnego określa się szerokość przerwy energetycznej, która jednoznacznie określa zawartość fosforu w  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ . Metoda ta jest metodą szybką, nie wymagającą dużych nakładów aparaturowych. Jest także metodą pośrednią, wymagającą wyskalowania jej innymi metodami.

### 3.4. Efekt fotowoltaiczny

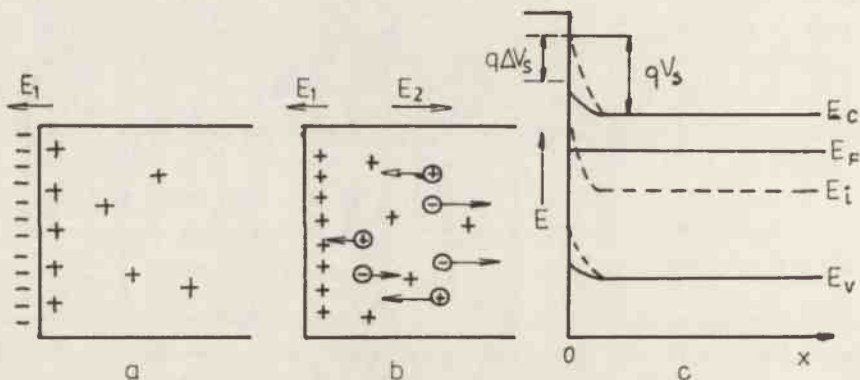
Przy napromieniowaniu półprzewodnika światłem o odpowiedniej długości fali, oprócz zjawisk objętościowych takich jak przewodnictwo fotoelektryczne, napięcie Dembera i fotoluminescencja, powstaje także napięcie fotowoltaiczne, które może być mierzone jako różnica potencjałów między naświetloną i nienaświetloną powierzchnią próbki. Jest to oczywiście jedna z wielu form zjawiska fotowoltaicznego. Napięcie to jest zależne od stanu powierzchni półprzewodnika i od szeregu parametrów objętościowych, takich jak: koncentracja nośników ładunku, ich czas życia, stała absorpcji i energia wzbudzenia głębszych defektów sieci.

Zawartość fosforu w  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$  określa się z przebiegu krzywej obrazującej zależność napięcia fotowoltaicznego w funkcji długości fali. Metodę tę charakteryzuje duża zdolność rozdzielcza, dzięki silnie skoncentrowanej wiązce świetlnej padającej na mierzoną próbkę. Nie wymaga ona dużych nakładów aparaturowych, a odpowiednie zautomatyzowanie układu czyni tę metodę przydatną do pomiarów produkcyjnych. Metoda ta, oprócz możliwości określania zawartości fosforu w warstwach epitaksjalnych  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$  w obszarze przypowierzchniowym, pozwala na określenie składu "x" w głąb warstwy, wzdłuż szlif skośnego,

#### 4. WIDMO NAPIĘCIA FOTOWOLTAICZNEGO

Opisana w tej pracy metoda pomiaru zawartości fosforu w warstwach epitaksjalnych  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$  oparta jest na efekcie fotowoltaicznym, przy wykorzystaniu kontaktu: elektrolit - półprzewodnik.

Na powierzchni półprzewodnika zanurzonego w elektrolicie absorbowane są jony tworzące tzw. warstwę Helmholtza, które wraz ze stanami energetycznymi zależnymi od powierzchni granicznej prowadzą do powstania elektrycznego ładunku powierzchniowego. Ładunek ten indukuje pod powierzchnią półprzewodnika strefę ładunku przestrzennego, co powoduje powstanie pola  $E_1$ . Tego rodzaju rozkład ładunku przedstawiono na rys. 3a.



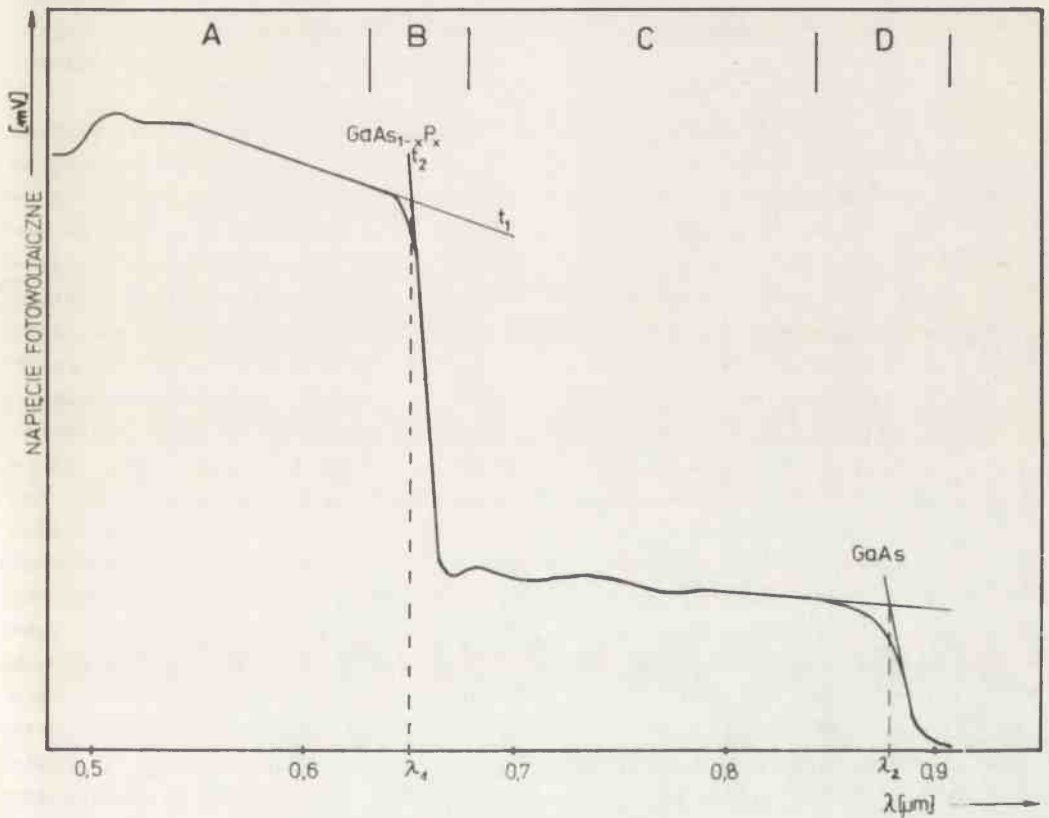
Rys. 3. Mechanizm powstawania napięcia fotowoltaicznego: a/ rozkład ładunku bez naświetlania, b/ rozkład ładunku przy naświetlaniu, c/ model pasm energetycznych obszaru przypowierzchniowego  
 - - - - - bez naświetlania,  
 \_\_\_\_\_ przy naświetlaniu

Naświetlenie półprzewodnika, np. typu "n", powoduje generację w jego objętości dodatkowych par nośników ładunku. Droga dyfuzji ładunki dodatnie dostają się do obszaru ładunku przestrzennego, gdzie pod wpływem



pola  $E_1$  przyciągane są do powierzchni półprzewodnika i dodatkowo tworzą ze swej strony pole  $E_2$ . Pole to ma przeciwny kierunek niż pole  $E_1$  i powoduje jego zmniejszanie się. Pociąga to za sobą zmniejszanie się przegięcia pasma /rys. 3c/. W ten sposób powstaje między naświetloną i nie-naświetloną powierzchnią różnica potencjałów, którą można zmierzyć jako napięcie fotowoltaiczne.

Dla  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$  typu "n" wartość i znak napięcia fotowoltaicznego zależy od koncentracji nośników ładunku przestrzennego, koncentracji dodatkowo uzyskanych mniejszościowych nośników ładunku, jak również od pierwotnego przegięcia pasma w kierunku powierzchni. Z grupy tych parametrów koncentracja dodatkowo uzyskanych po oświetleniu mniejszościowych nośników ładunku zależna jest od długości fali wiązki świetlnej i wpływa przez to na przebieg widm napięcia fotowoltaicznego. Lokalne fluktuacje związane z niejednorodnym rozkładem domieszek, naprężeniami itp. także wywołują lokalne pola. Większość tych pól występuje w przypadkowych kierunkach, dlatego też wypadkowa siła elektromotoryczna wynosi zero.



Rys. 4. Widmo napięcia fotowoltaicznego w funkcji długości fali

Na podstawie rys. 4, który przedstawia przykładowe widmo napięcia fotowoltaicznego, rozważa się cztery obszary. W krótkofalowym obszarze A, dla bardzo małej głębokości wnikania, napięcie fotowoltaiczne jest prawie niezależne od długości fali światła padającego na próbkę. W zakresie długości fali  $\lambda \geq \frac{hc}{E_g}$  padającego światła spada gwałtownie koncentracja wytwarzanych par elektron-dziura, tak że osiąga się zagięcie w widmie fotowoltaicznym, z którego określa się szerokość przerwy energetycznej w  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$  /obszar B/. Przy dalszym wzroście długości fali /obszar C/ światło wnika do najbardziej absorbującej warstwy  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ , aż osiągnie granicę podłoża  $\text{GaAs}$ . W obszarze tym napięcie fotowoltaiczne jest znowu niezależne od długości fali światła padającego na próbkę, a w obszarze D następuje zagięcie w widmie fotowoltaicznym, z którego można określić szerokość przerwy energetycznej  $\text{GaAs}$ .

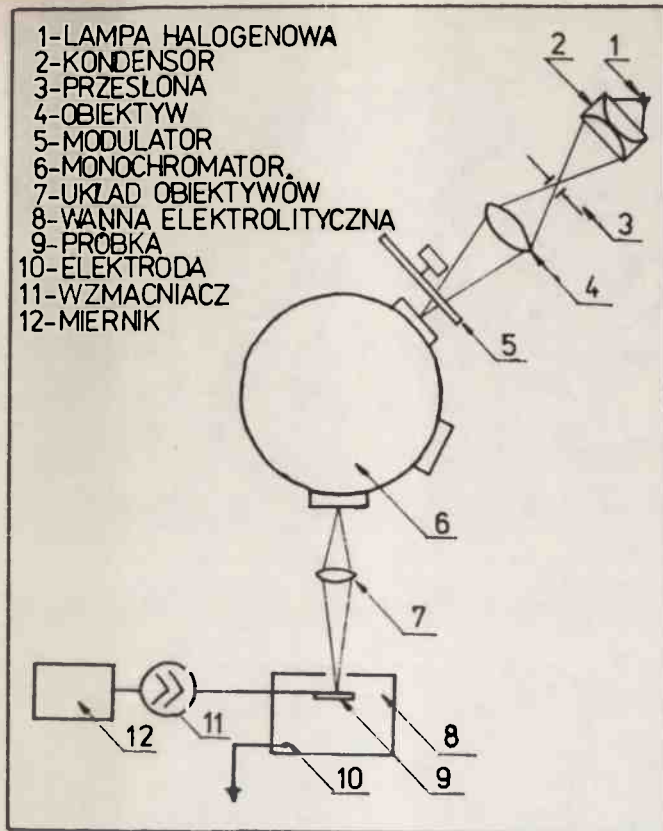
## 5. UKŁAD POMIAROWY I PRZYGOTOWANIE PRÓBEK DO POMIARU

W pracy tej opisana jest metoda pomiaru rozkładu fosforu w warstwach epitaksjalnych  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$  w oparciu o efekt fotowoltaiczny, przy wykorzystaniu kontaktu: elektrolit - półprzewodnik. Schemat układu pomiarowego przedstawiony jest na rys. 5.

Jako źródło światła zastosowano lampę halogenową /1/, której światło po przejściu przez układ soczewek /2,4/ i modulator /5/ jest ogniskowane na szczelinie wejściowej monochromatora pryzmatycznego /6/. Spekttralnie rozczepione światło po wyjściu z monochromatora jest ogniskowane poprzez układ obiektywów mikroskopowych /7/ na zanurzonej w elektrolicie fragmencie próbki półprzewodnikowej /9/. Dzięki układowi obiektywów mikroskopowych uzyskano plamkę świetlną o średnicy  $\phi = 25 \mu\text{m}$ . Pionowo umieszczona w uchwycie próbka  $\text{GaAsP}$  zanurzona jest do połowy w elektrolicie. Kwarcowa wanna elektrolityczna /8/ wraz z próbką posiada przesuw za pomocą specjalnie do tego celu przystosowanego stolika XY. Napięcie fotowoltaiczne zbierane jest przez elektrodę platynową /10/, zanurzoną w elektrolicie w pobliżu obszaru oświetlonego próbki i kontakt dociskowy na powierzchni niezanurzonej części próbki. Jest ono wzmacniane przez wzmacniacz homodynamiczny i mierzone przez nanowoltomierz. Zastosowanie modulacji światła oraz wzmacniacza homodynamicznego jest konieczne, by wyeliminować prądy indukowane w przewodach w wyniku przypadkowych zakłóceń pola elektromagnetycznego. Z powodu dużej wrażliwości badanych materiałów półprzewodnikowych na oświetlenie, układ dokładnie osłonięto od światła zewnętrznego.

Pomiar rozkładu fosforu w głąb warstw epitaksjalnych  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$  przeprowadzono na szlifach skośnych o kątach nachylenia rzędu  $10^\circ$ . Wykonano je napaścią diamentowej o gradacji  $1 \mu\text{m}$ . Elektrolitem zastosowanym w pomiarach był 1% roztwór KOH.





Rys. 5. Schemat układu pomiarowego do określania napięcia fotowoltaicznego

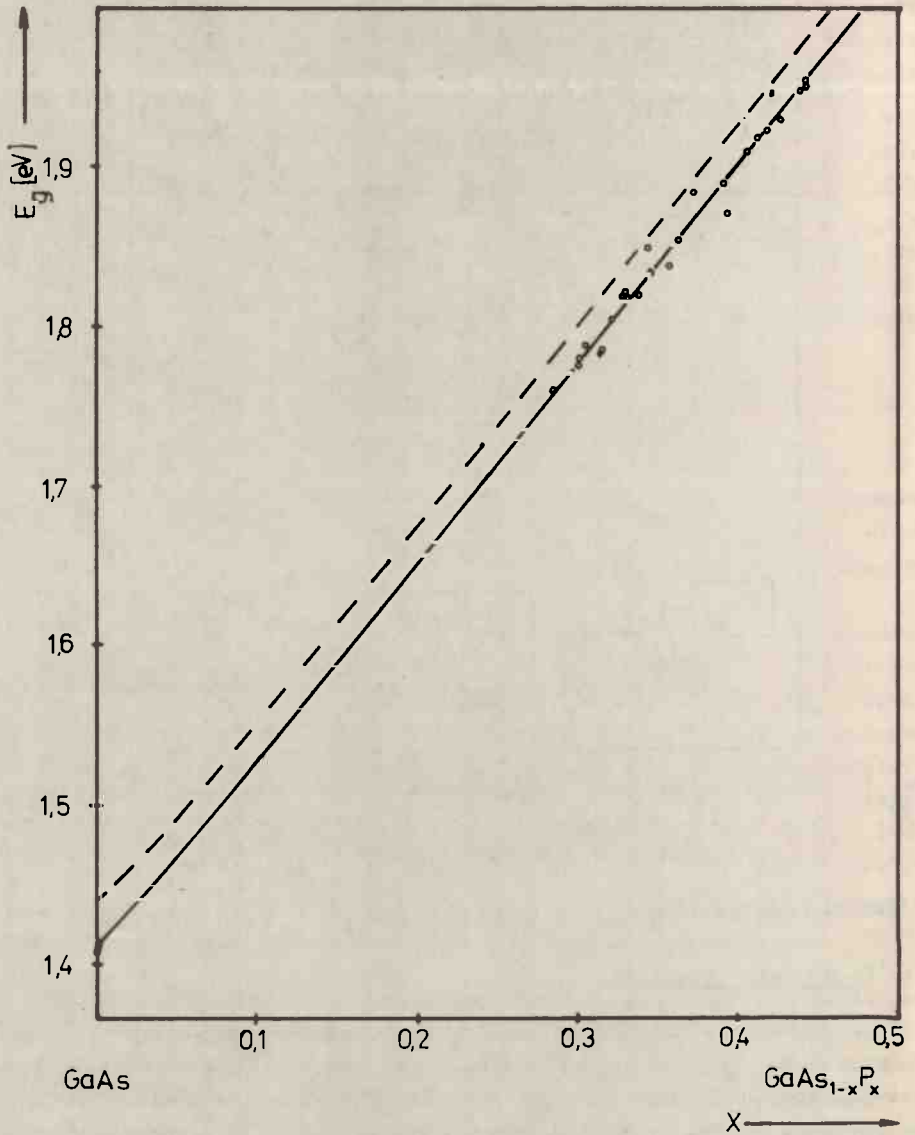
## 6. WYNIKI DOSWIADCZALNE

### 6.1. Cechowanie aparatury

Do wycelowania układu pomiarowego użyto wzorcowych warstw epitaksjalnych  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$  i  $\text{GaAs}$ , wyprodukowanych przez Zakład Związków Półprzewodnikowych CNPME, o różnej koncentracji fosforu w zakresie  $0 < x < 0,45$ . Koncentracja fosforu w tych warstwach została określona metodą dyfrakcji rentgenowskiej.

Na rys. 6 przedstawiono krzywą, otrzymaną na podstawie kalibracji, wyrażającą zależność szerokości przerwy energetycznej  $E_g^r$  dla  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$  w funkcji współczynnika "x" w zakresie  $0 < x < 0,45$  i porównano ją z krzywą, otrzymaną z zależności /2/. Kształt krzywej otrzymanej z danych pomiarowych zgodny jest z kształtem krzywej otrzymanej wg danych lite-

ratuowych. Wykazuje jednak nieznaczne /0,023 eV/, systematyczne odchylenie od niej, co potwierdzają autorzy prac [9,11].



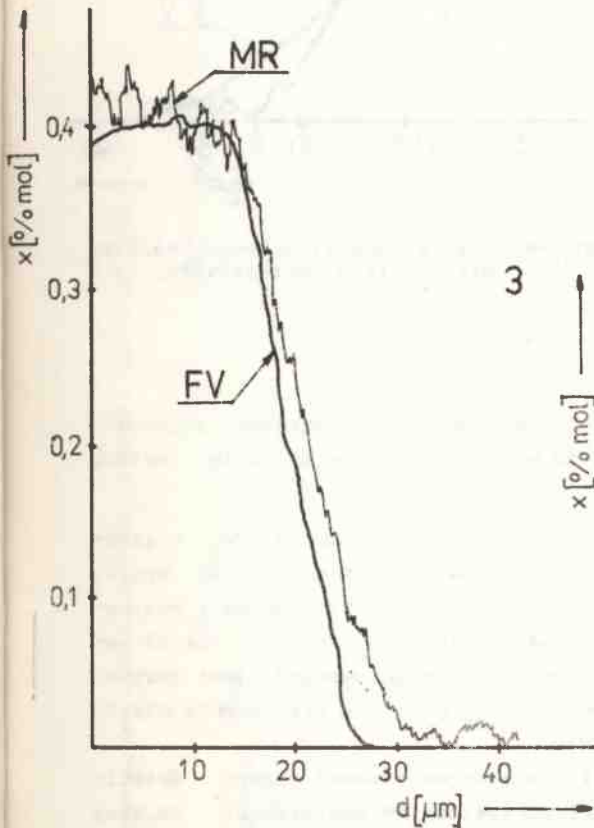
Rys. 6. Zależność szerokości przerwy energetycznej  $E_g$  w  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$  w funkcji ułamka molowego fosforu:  
 - - - - - krzywa otrzymana na podstawie danych z literatury  
 ————— krzywa otrzymana na podstawie kalibracji

#### 6.2. Określenie współczynnika "x" w warstwach epitaksjalnych $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$

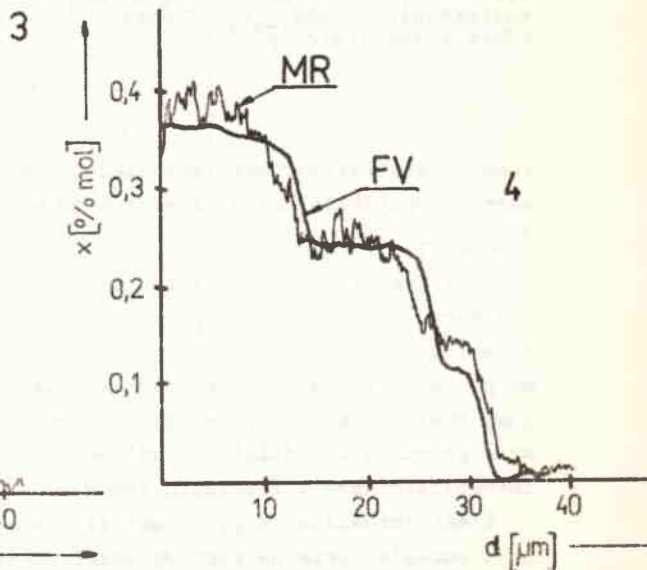
Jak wspomniano w punkcie 6.1 wartość ułamka molowego fosforu odczytuje się z krzywej kalibracji /rys. 6/, znając szerokość przerwy ener-

getycznej. Szerokość tę określa się z krawędzi absorpcji widma fotowoltaicznego, wyznaczając punkt przecięcia się dwu stycznych  $t_1$  i  $t_2$ , jak to zaznaczono na rys. 4.

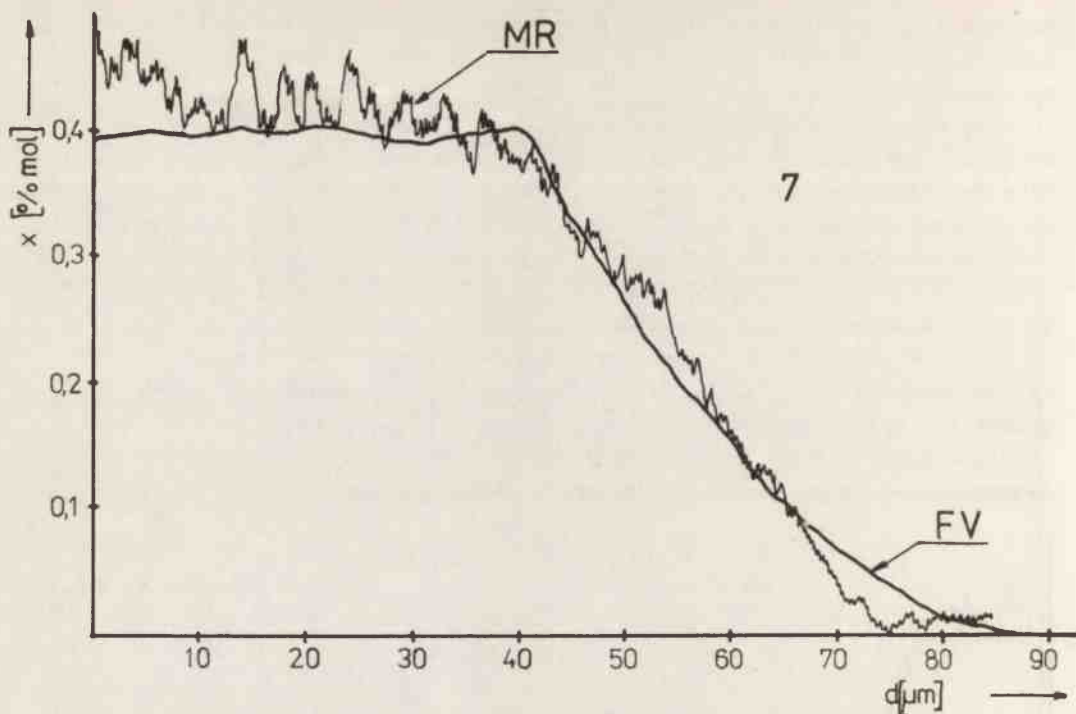
Przy pomocy efektu fotowoltaicznego, prowadząc pomiar wzdłuż szlifukośnego, dokonano pomiaru ilościowych i jakościowych zmian współczynnika "x" w głąb warstwy epitaksjalnej  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ . Pomiarów tych dokonano na próbkach otrzymanych z fazy gazowej techniką  $\text{AsCl}_3 - \text{PCl}_3 - \text{Ga} - \text{HCl} - \text{H}_2$  /metoda chlorkowa/ /próbki nr 1,2,7/ oraz techniką  $\text{AsH}_3 - \text{PH}_3 - \text{Ga} - \text{HCl} - \text{H}_2$  /metoda wodorkowa/ /próbki nr 3,4,5,6,8,9/, domieszkowanych Te i Se, osadzanych na podłożu GaAs o odchyleniu  $2,5 \pm 3^\circ$  od płaszczyzny /100/. W celach porównawczych dokonano na tych próbkach pomiaru rozkładów współczynnika "x" w głąb tych warstw metodami: mikroanalizy rentgenowskiej i fotoluminescencji. Przykładowe wyniki tych pomiarów przedstawiono na rys. 7,8,9. W tabelicy 1 zebrano liczbowe wyniki przeprowadzonych badań. Z obu metod określono dla każdej próbki: koncentrację,



Rys. 7. Zależność zmiany ułamka molowego "x" w funkcji grubości warstwy epitaksjalnej  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ . Próbka 3. MR - mikroanaliza rentgenowska, FV - efekt fotowoltaiczny



Rys. 8. Zależność zmiany ułamka molowego "x" w funkcji grubości warstwy epitaksjalnej  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ . Próbka 4. MR - mikroanaliza rentgenowska, FV - efekt fotowoltaiczny



Rys. 9. Zależność zmiany ułamka molowego "x" w funkcji grubości warstwy epitaksjalnej  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ . Próbka 7. MR - mikroanaliza rentgenowska, FV - efekt fotowoltaiczny

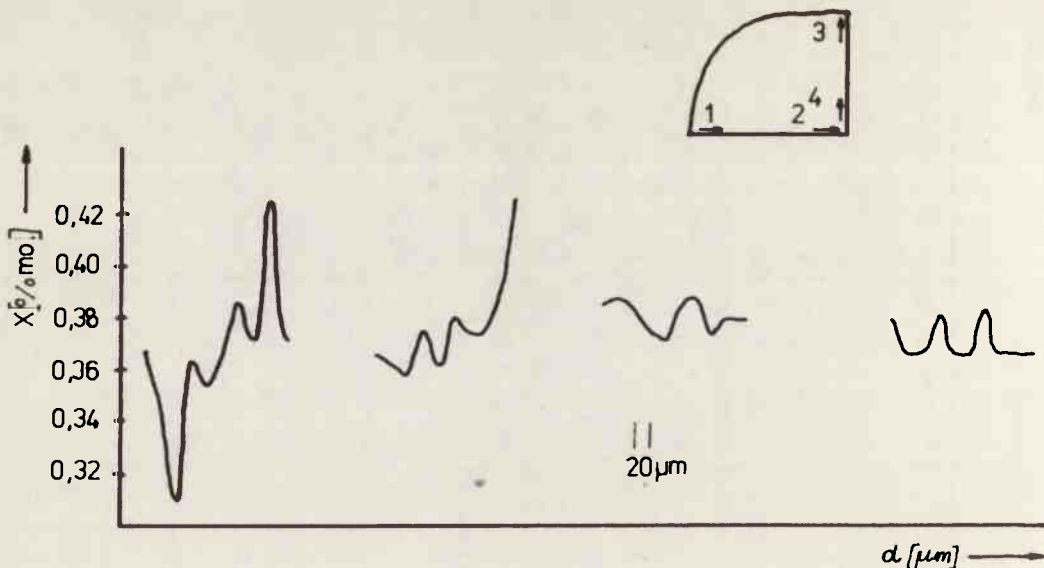
ruchliwość, wartość współczynnika "x" na powierzchni warstwy, szerokość warstwy epitaksjalnej  $d_x$  i szerokość warstwy o stałym składzie fosforu  $d_{x=\text{const}}$ .

Charakter ilościowych zmian współczynnika "x" w głąb warstw epitaksjalnych, określony przy pomocy efektu fotowoltaicznego, jak to wynika z zamieszczonych rysunków i tablicy, zgadza się bardzo dobrze z wynikami pomiarów wykonanych metodą mikroanalizy rentgenowskiej. Udział molowy fosforu, określony metodą mikroanalizy rentgenowskiej, jest zawyżony w stosunku do udziału określonego metodą pomiarów przy pomocy efektu fotowoltaicznego i fotoluminescencji.

Efekt fotowoltaiczny, dzięki silnie skoncentrowanej wiązce świetlnej, pozwala także na pomiary rozkładu fosforu na powierzchni warstwy epitaksjalnej. Na rys. 10 zamieszczono wyniki pomiaru współczynnika "x" na powierzchni warstwy  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$  otrzymanej metodą wodorkową. Pomiaru dokonano w czterech miejscach, wzdłuż średnic, co 20  $\mu\text{m}$ . Kierunek 1 - 2,

Niektóre parametry warstw epitaksjalnych, mierzone różnymi metodami

Nr próbki	Met. otrzym.	Domiesz.	Koncentracja $[cm^{-3}]$	Ruchliwość $[cm^2/Vs]$	Efekt fotowoltaiczny		Mikroanaliza rentgen.		Fotolumin. $x$ $[\%mol]$	
					$x$ $[\%mol]$	$d_x$ $[\mu m]$	$d_x=const$ $[\mu m]$	$x$ $[\%mol]$		$d_x$ $[\mu m]$
1	Ch	Te	$6,17 \times 10^{17}$	1074	0,31	36,5	10,0	37,5	11	0,323
2	Ch	Te	$5,6 \times 10^{17}$	1284	0,399	55,0	12,5	52,0	14	0,400
3	W	Te	$1,65 \times 10^{17}$	1055	0,40	30,0	12,0	32,5	10	0,395
4	W	Se	$2,4 \times 10^{17}$	1021	0,365	37,5	6,0	36,0	7	-
5	W	Se	$5,0 \times 10^{17}$	1097	0,34	37,5	-	30,0	-	0,355
6	W	Se	$7,2 \times 10^{17}$	1009	0,34	65,0	22,5	61,0	19	0,357
7	Ch	Te	$6,32 \times 10^{16}$	1032	0,394	87,5	40,0	75,0	37,5	0,398
8	W	Se	$3,6 \times 10^{17}$	2711	0,35	44,0	10,0	42,5	11	0,361
9	W	Te	$2,3 \times 10^{17}$	1067	0,40	46,0	27,5	45,0	28	0,404



Rys. 10. Mikrorozkład zawartości fosforu na powierzchni warstwy epitaksjalnej  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ . Próbką 4

który w czasie otrzymania warstwy był równoległy do przepływu gazów w reaktorze, wykazuje duży gradient koncentracji domieszek i współczynnika "x".

## 7. OCENA BŁĘDÓW

Pomiar współczynnika "x" obarczony jest błędem, który w całości jest trudny do oszacowania. Dokładność pomiaru napięcia fotowoltaicznego w funkcji długości fali oszacowana metodą różniczki zupełnej wynosiła 4%. Błąd w określeniu przerwy energetycznej z widma napięcia fotowoltaicznego wynika z eksponencjalnego przebiegu tego widma w pobliżu jego przecięcia, co związane jest z istnieniem ogonów gęstości stanów [12]. Określenie współczynnika "x" wgłąb warstw epitaksjalnych obarczone jest jeszcze dodatkowo błędem pomiaru kąta szlifów.

## 8. WNIOSKI

1. Jak wykazały przeprowadzone pomiary, metoda efektu fotowoltaicznego pozwala z dużą dokładnością określić rozkład fosforu wgłąb warstwy epitaksjalnej  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ .



2. Dzięki dużej zdolności rozdzielczej, którą otrzymano silnie koncentrując wiązkę świetlną, można określić mikrorozkłady współczynnika "x" na powierzchni warstw epitaksjalnych  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ .
3. Odpowiednie zautomatyzowanie układu, co wpłynie na skrócenie czasu pomiaru i opracowanie wyników, uczyni tę metodę przydatną do pomiarów produkcyjnych.

#### LITERATURA

1. Casey H.C., Panisch M.B.: J.Appl.Phys. 40, 1968, 4910.
2. Naninche Y., Nishida K., Mizusawa K.: Jap.J.Appl.Phys. 9, 1970, 332.
3. Rubenstein M.: J.Elektrochem.Soc. 112, 1965, 426.
4. Thompson A.G., Wolley J.C.: Can.J.Phys. 45, 1967, 255.
5. Spitzer W.C., Mead C.A.: Phys.Rev. 133A, 1964, 872.
6. Herzog A.H., Groves W.O., Craford M.G.: J.Appl.Phys. 40, 1969, 1830.
7. Goldbach G., Graff K.: Wissenschaftl.Brichte AEG-Telefunken 42, 1969, 156.
8. Thompson A.G., Cordona M., Shakle K.L.: Phys.Rev. 2, 1966, 601.
9. Graff K., Pieper H.: Solid-State Elektron. 15, 1972, 831.
10. Straumanis M.E.: J.Elektrochem.Soc. Solid-State Science 114, 1967, 640.
11. Goldbach G., Graff K.: AEG-Telefunken 42, 1969, 156.
12. Pankow J.F.: "Zjawiska optyczne w półprzewodnikach", W-wa 1974.