

**INSTYTUT TECHNIKI MIKROSYSTEMÓW
POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ**

**BADANIE WARUNKÓW OSADZANIA
HETEROSTRUKTUR (Ga, In) As/GaAs
PRZEZNACZONYCH DO WYTWARZANIA
PRZYRZĄDÓW PÓŁPRZEWODNIKOWYCH**

Damian RADZIEWICZ
Rozprawa doktorska

Słowa kluczowe:

półprzewodnik, arsenek galowo-indowy,
epitaksja, osadzanie, MOVPE,
studnia kwantowa, heterostruktura,
warstwa, dioda, detektor, fotoodbiornik,

Wrocław 2001

Mgr inż. Damian Radziewicz
Instytut Techniki Mikrosystemów
Politechnika Wrocławska
ul. Janiszewskiego 11/17
50-372 Wrocław

Praca niniejsza została przedstawiona Radzie Naukowej
Instytutu Techniki Mikrosystemów Politechniki Wrocławskiej
jako rozprawa doktorska

Promotor:
prof. dr hab. inż. Benedykt W. Licznerski

Autor pragnie podziękować:

promotorowi prof. dr hab. inż. Benedyktowi W. Licznerskiemu za życzliwą opiekę sprawowaną podczas powstawania rozprawy i wnikliwe, i cenne uwagi, Koleżankom i Kolegom z Zakładu Przyrządów Półprzewodnikowych za pomoc.

Specjalne podziękowania składam dr inż. Markowi Tłaczale za wszechstronną pomoc, która przyczyniła się do powstania niniejszej pracy.

SPIS TREŚCI

SPIS UŻYWANYCH OZNACZEŃ, SKRÓTÓW I AKRONIMÓW	6
--	---

ROZDZIAŁ I

Wstęp.	9
--------	---

ROZDZIAŁ II

Porównanie właściwości i parametrów fizykochemicznych związków podwójnych, potrójnych i poczwórnych (Ga, In) – (As, P).	12
2.1. Parametry strukturalne.	12
2.2. Parametry fizyczne.	14
2.3. Zalety i ograniczenia układu materiałowego (Ga, In) – (As, P).	16
2.3.1. Zalety.	16
2.3.2. Ograniczenia technologiczne.	16

ROZDZIAŁ III

Metody wytwarzania oraz zastosowanie epitaksjalnych heterostruktur (Ga, In) – (As, P).	19
3.1. Metody wytwarzania heterostruktur epitaksjalnych (Ga, In) – (As, P).	20
3.1.1. MBE.	20
3.1.2. MOVPE.	21
3.2. Możliwości aplikacji heterostruktur (Ga, In) – (As, P).	22
3.2.1. Diody elektroluminescencyjne i laserowe.	22
3.2.1.a. Laser DH.	22
3.2.1.b. Lasery z pojedynczą i wielokrotną studnią kwantową.	24
3.2.1.c. Lasery DFB i DBR.	28
3.2.2. Detektory PIN i MSM.	29
3.2.3. Polowe tranzystory mikrofalowe.	30
3.2.4. Fotoodbiorniki.	31
3.3. Wnioski.	32

ROZDZIAŁ IV

Konstrukcja laboratoryjnego stanowiska badawczego MOVPE.	34
4.1. Układ gazowy – dozownik gazów i reagentów.	34
4.1.1. Konfiguracja dozownika.	34
4.1.2. Źródła gazów i związków metaloorganicznych.	35
4.2. Reaktor epitaksjalny.	37

4.3. System sterowania procesem.	38
4.4. Wnioski.	38

ROZDZIAŁ V

Wytwarzanie epitaksjalnych warstw $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$.	40
5.1. Wybór podłoża arsenkowogalowych.	40
5.2. Przygotowanie podłoża arsenkowogalowych.	40
5.3. Dobór parametrów osadzania warstw $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ na podłożu GaAs.	41
5.4. Określenie składu warstwy w zależności od przepływu wodoru przez TMGa.	45
5.5. Wnioski.	45

ROZDZIAŁ VI

Charakteryzacja heterostruktur $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$.	47
6.1. Właściwości strukturalne warstw i studni kwantowych $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$.	47
6.1.1. Układ pomiarowy i wyniki pomiarów.	47
6.1.2. Pomiary krzywych odbić warstw $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$.	48
6.1.3. Pomiary map sieci odwrotnych heterostruktur $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$.	52
6.1.4. Pomiary krzywych dyfrakcyjnych MQW.	55
6.2. Właściwości optyczne warstw i studni kwantowych $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$.	57
6.2.1. Teoria.	57
6.2.2. Spektroskopia fotoodbiciowa.	59
6.2.3. Wyniki pomiarów.	60
6.2.4. Pomiary fotoluminescencji wielokrotnych studni kwantowych.	66
6.3. Właściwości elektrofizyczne warstw $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$.	68
6.3.1. Pomiary pojemnościowo–napięciowe z zastosowaniem trawienia elektrochemicznego.	68
6.3.2. Pomiary spektroskopii fotowoltaicznej.	69

ROZDZIAŁ VII

Charakterystyki diod LED i detektorów PIN oraz MSM.	71
7.1. Diody typu LED.	71
Wnioski.	86
7.2. Detektory typu PIN i MSM.	86
Wnioski.	90

ROZDZIAŁ VIII

Podsumowanie. Wnioski końcowe.	92
--------------------------------	----

Podsumowanie.	92
Wnioski końcowe.	93
BIBLIOGRAFIA	95
DODATEK A	
Informacja na temat wykorzystania części pracy w publikacjach.	99

SPIS UŻYWANYCH OZNACZEŃ, SKRÓTÓW I AKRONIMÓW

- a – parametr sieciowy,
A – amplituda,
A, B, C, D – symboliczne oznaczenie pierwiastków grupy III i V,
AIIIBV – związki półprzewodnikowe III i V grupy układu okresowego,
BH – laser paskowy z zagrzebaną heterostrukturą (**Burried Heterostructure**),
CBE – epitaksja z wiązek chemicznych (**Chemical Beam Epitaxy**),
DBR – laser ze zwierciadłem braggowskim (**Distributed Bragg Reflector**),
DEZn – dietylocynk,
DFB – laser z rozłożonym sprzężeniem zwrotnym (**Distributed FeedBack**),
DH – laser z dwoma heterozłączami (**Double Heterostructure**),
DMZn – dimetylocynk,
EC– V – pomiary pojemnościowo– napięciowe z zastosowaniem trawienia elektrochemicznego (**Electrochemical Capacitance–Voltage**),
EDFA – wzmacniacz światłowodowy domieszkowany erbem (**Erbium Doped Fiber Amplifier**),
 E_g – energia pasma zabronionego, przerwa energetyczna półprzewodnika,
 $E_{g,dir}$ – przerwa energetyczna półprzewodnika dla przejścia prostego,
FET – tranzystor polowy (**Field Effect Transistor**),
FSR – zakres widmowy detektora, w którym nie występuje detekcja (**Free Spectral Range**),
FWHM – szerokość połówkowa krzywej (**Full Width at Half Maximum**),
GRIN – struktura z gradientową zmianą współczynnika załamania (**Graded Refractive INdex**),
GSMBE – epitaksja z wiązek molekularnych z użyciem źródeł gazowych (**Gas Source Molecular Beam Epitaxy**),
HEMT – tranzystor z podwyższoną ruchliwością elektronów (**High Electron Mobility Transistor**),
HRD – dyfrakcja rentgenowska wysokiej rozdzielczości (**High Resolution Diffraction**),
IR – promieniowanie podczerwone (**InfraRed**),
JFET – tranzystor polowy złączowy (**Junction Field Effect Transistor**),
L – długość rezonatora diody elektroluminescencyjnej,
LED – dioda elektroluminescencyjna (**Light Emitting Diode**),
LPE – epitaksja z fazy ciekłej (**Liquid Phase Epitaxy**),
LPMOVPE – epitaksja z fazy gazowej z użyciem związków metaloorganicznych, prowadzona przy obniżonym ciśnieniu (**Low Pressure Metal Organic Vapour Phase Epitaxy**),

m – współczynnik,
 MBE – epitaksja z wiązek molekularnych (**M**olecular **B**eam **E**pitaxy),
 MESFET – tranzystor polowy ze złączem metal– półprzewodnik (**M**etal–
 Semiconductor **F**ield **E**ffect **T**ransistor),
 MFC – regulator przepływu masy (**M**ass **F**low **C**ontroler),
 ML – warstwa monoatomowa (**M**ono**L**ayer),
 MOMBE – epitaksja z wiązek molekularnych z użyciem związków
 metaloorganicznych (**M**etal**O**rganic **M**olecular **B**eam **E**pitaxy),
 MOMIC – monolityczny układ scalony optoelektroniczno – mikrofalowy
 (**M**onolithic **O**ptoelectronic **M**icrowave **I**ntegrated **C**ircuit),
 MOVPE – epitaksja z fazy gazowej z użyciem związków metaloorganicznych
 (**M**etal**O**rganic **V**apour **P**hase **E**pitaxy),
 MQW – układ wielokrotnych studni kwantowych (**M**ultiple **Q**uantum **W**ell),
 MSM – detektor ze złączem metal– półprzewodnik– metal (**M**etal–
 Semiconductor–**M**etal),
 RCE MSM – detektor ze złączem metal– półprzewodnik– metal z efektem
 rezonansowego wzmocnienia optycznego (**R**esonant **C**avity
Enhanced **M**etal–**S**emiconductor–**M**etal),
 n – współczynnik załamania światła,
 n, p – typ półprzewodnictwa,
 OEIC – układ scalony opto–elektroniczny (**O**pto**E**lectronic **I**ntegrated **C**ircuit),
 PC – sterownik ciśnienia (**P**ressure **C**ontroler),
 PIN – detektor ze złączem p–i–n (**p**–type **i**ntrinsic **n**–type),
 RCE PIN – detektor ze złączem p–i–n z efektem rezonansowego wzmocnienia
 optycznego (**R**esonant **C**avity **E**nhanced **p**–type **i**ntrinsic **n**–type),
 PL – spektroskopia fotoluminescencji (**P**hoto**L**uminescence),
 P_{outpeak} – moc optyczna wyjściowa w pikcie,
 P_{outtotal} – moc optyczna wyjściowa całkowita,
 PR – spektroskopia fotoodbiciowa (**P**hoto**R**eflectance),
 PVS – spektroskopia fotowoltaiczna (**P**hoto**V**oltaic **S**pectroscopy),
 QWIP – detektor podczerwieni wykonany z zastosowaniem studni kwantowych
 (**Q**uantum **W**ell **I**nfrared **P**hotodetector),
 QW – studnia kwantowa (**Q**uantum **W**ell),
 RCE – rezonansowe wzmocnienie optyczne (**R**esonant **C**avity **E**nhanced),
 RHEED – dyfrakcja odbiciowa elektronów o dużej energii (**R**eflection **H**igh
Energy **E**lectron **D**iffraction),
 SQW – pojedyncza studnia kwantowa (**S**ingle **Q**uantum **W**ell),
 TBP – tertiatrybutylofosfor,

TEGa – trietylogal,
 TEIn – trietyloind,
 TMGa – trimetylogal,
 TMIn – trimetyloind,
 t_{bar} – czas wzrostu warstwy barierowej,
 t_{buf} – czas wzrostu warstwy buforowej,
 T_{TMGa} – temperatura trimetylogalu,
 T_{TMIn} – temperatura trimetyloindu,
 T_w – temperatura wygrzewania podłoża,
 T_{wz} – temperatura wzrostu warstwy epitaksjalnej,
 t_w – czas wygrzewania podłoża,
 t_{wz} – czas wzrostu warstwy epitaksjalnej,
 UHV – ultrawysoka próżnia (**U**ltra **H**igh **V**acuum),
 $V_{\text{H}_2/\text{TMGa}}$ – prędkość przepływu wodoru przez saturator z trimetylomgalem,
 $V_{\text{H}_2/\text{TMIn}}$ – prędkość przepływu wodoru przez saturator z trimetyloindem,
 $V_{\text{H}_2\text{RUN}}$ – prędkość przepływu wodoru przez linię RUN,
 $V_{\text{H}_2\text{VENT}}$ – prędkość przepływu wodoru przez linię VENT,
 VPE – epitaksja z fazy gazowej (**V**apour **P**hase **E**pitaxy),
 w – grubość warstwy epitaksjalnej,
 x, y – zawartość pierwiastków grupy III i V w związkach półprzewodnikowych trzy-
 i czteroskładnikowych,
 Γ – parametr poszerzenia,
 $\epsilon(0)$ – statyczna stała dielektryczna,
 $\epsilon(\infty)$ – graniczna wysokoczęstotliwościowa stała dielektryczna,
 λ – długość fali,
 Θ – kąt Bragga,
 v_{wz} – średnia szybkość wzrostu warstwy epitaksjalnej.

ROZDZIAŁ I

Wstęp.

Nowe technologie, oparte na epitaksjalnym wzroście materiałów AIIIIV umożliwiają wytwarzanie złożonych heterostruktur półprzewodnikowych, które stosuje się we współczesnych przyrządach optoelektronicznych i mikrofalowych, są jednym z czynników umożliwiających szybki rozwój telekomunikacji i systemów informatycznych. W 2000 roku Zhores J. Alferov i Herbert Kroemer otrzymali nagrodę Nobla, za wykazanie w swych pionierskich pracach, że możliwy jest kontrolowany wzrost wieloskładnikowych związków AIIIIV.

Kolejnym czynnikiem rozwoju zaawansowanych przyrządów optoelektronicznych i mikrofalowych było opanowanie techniki wytwarzania struktur niskowymiarowych, których charakterystyki wyjściowe w dużym stopniu uwarunkowane były zjawiskami kwantowymi. Postęp w tym zakresie możliwy był przede wszystkim dzięki rozwojowi nowoczesnych technik epitaksjalnego wzrostu. Obecnie możliwa jest kontrola grubości i składu poszczególnych warstw epitaksjalnych na poziomie atomowym. Do takich technik zalicza się MBE (Molecular Beam Epitaxy – epitaksja z wiązek molekularnych) i MOVPE (MetalOrganic Vapour Phase Epitaxy – epitaksja z fazy gazowej z zastosowaniem związków metaloorganicznych). Współczesna technika epitaksjalna musi zapewnić powtarzalny i ekonomiczny wzrost struktur wysokiej jakości tzn. opanowanie kontrolowanego procesu wzrostu heterostruktur o grubościach na poziomie pojedynczych warstw atomowych o pożądanym składzie, rozkładzie i profilu domieszkowania oraz praktycznie idealnej międzypowierzchni.

Technikę MOVPE można zaliczyć do tych metod, które z jednej strony zapewniają wszystkie warunki niezbędne w procesie badań dotyczących wytwarzania struktur niskowymiarowych, a z drugiej strony gwarantują dużą uniwersalność i szybkość wdrażania nowych rozwiązań. Równocześnie jest najlepszą obecnie techniką spełniającą wymagania masowej produkcji.

W niniejszej pracy badano heterostruktury $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$. Taki wybór związany był przede wszystkim z szerokim praktycznym zastosowaniem tego materiału w konstrukcji nowoczesnych przyrządów i układów scalonych. Trójskładnikowy związek $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ jest podstawowym składnikiem aktywnych obszarów źródeł światła i detektorów pracujących w zakresie do $1,55\mu\text{m}$, a także

detektorów z efektami kwantowymi (QWIP) oraz elementów mikrofalowych pracujących w zakresie częstotliwości większych od 100GHz. Istotnym ograniczeniem technologii heterostruktur zawierających ten materiał jest niedopasowanie sieciowe między $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ a GaAs, szczególnie duże dla zawartości indu większej od 30% ($x > 0,3$). Dla większych zawartości indu konieczne jest stosowanie podłoży z InP, które są zdecydowanie droższe i trudniejsze w obróbce technologicznej niż podłoża GaAs.

Nowe doniesienia literaturowe mówią, że ze względu na utrzymujące się wysokie ceny podłoży InP pojawia się tendencja do stosowania podłoży GaAs ze specjalnymi warstwami pośrednimi. Osadzone na nich heterostrukтуры $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x > 0,4$) wykorzystuje się do wytwarzania tranzystorów HEMT.

W niniejszej pracy autor skoncentrował się na opracowaniu technologii wytwarzania heterostruktur $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ z zawartością In do 20%. Celem przedstawionej pracy było:

Zbadanie kinetyki wzrostu heterostruktur $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$, w tym wielokrotnych studni kwantowych. Określenie korelacji pomiędzy parametrami procesu MOVPE, a właściwościami otrzymanych warstw.

Do głównych zadań należało:

1. Wyznaczenie wartości parametrów technologicznych zapewniających wzrost heterostruktur $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ z kontrolą zawartości In od 0 do 20%.
2. Określenie warunków epitaksjalnego wzrostu heterostruktur, w których nie występuje relaksacja naprężeń. Badanie wpływu grubości i składu warstw na stopień relaksacji i opracowanie metody pomiaru tego typu struktur.
3. Opracowanie technologii wytwarzania jednokrotnej i wielokrotnych studni kwantowych, a w szczególności opracowanie metody kontrolowanego i powtarzalnego wzrostu obszarów kwantowych o grubościach w zakresie od 6 do 30ML (MonoLayer – monowarstwa atomowa).
4. Opracowanie technologii podłoży aktywnych z zastosowaniem heterostruktur $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ przeznaczonych do konstrukcji wybranych przyrządów opto- i mikroelektronicznych.

Wszystkie prace technologiczne prowadzono w Zakładzie Przyrządów Półprzewodnikowych Instytutu Techniki Mikrosystemów Politechniki Wrocławskiej. Warstwy wytwarzano w reaktorze MOVPE AIX 200 R&D firmy Aixtron GmbH. Część badań, dotyczących właściwości optycznych opracowanych heterostruktur i struktur MQW, wykonano w Instytucie Fizyki Politechniki

Wrocławskiej. Bardzo dobra baza technologiczna i dostęp do wielu metod pomiarowych umożliwiały szybką i wszechstronną charakteryzację wytwarzanych heterostruktur. Szczegółowe badania obejmowały:

1. Opracowanie metodyki eksperymentu.
2. Określenie optymalnych parametrów kinetyki wzrostu naprężonych heterostruktur z ostrymi granicami rozdziału (temperatura i szybkość wzrostu, przesycenie poszczególnych reagentów, szybkości liniowe reagentów), oraz wyznaczenie krzywych kalibracyjnych stanowiska.
3. Opracowanie technologii jedno- i wielokrotnych studni kwantowych z kontrolą grubości i składu studni oraz bariery.
4. Opracowanie struktur detektorów z wewnętrznym optycznym wzmocnieniem.
5. Opracowanie technologii wytwarzania podłoża aktywnego przeznaczonego do konstrukcji scalonego fotoodbiornika, dla zakresu częstotliwości większej od 1GHz.
6. Określenie korelacji między parametrami procesów technologicznych a właściwościami warstw struktur niskowymiarowych oraz wybranych struktur przyrządowych.

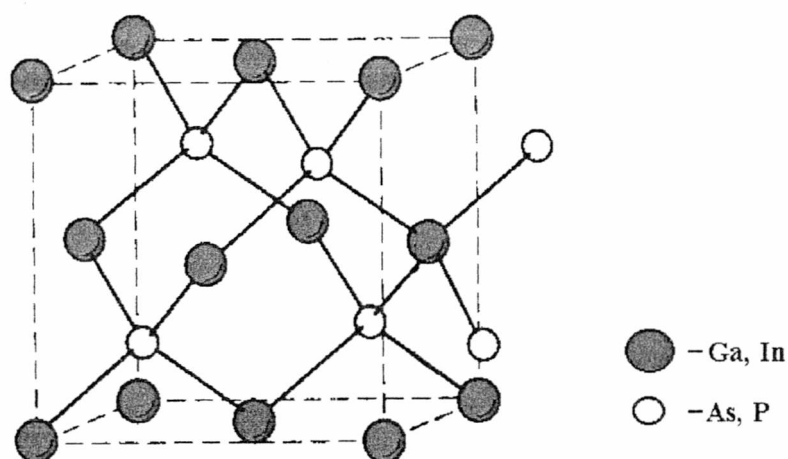
Celem praktycznym wymienionych wyżej zadań i przeprowadzonych badań było opracowanie procesów wytwarzania aktywnych podłoży spełniających wymagania stawiane konstrukcjom zaawansowanych opto-mikrofalowych układów scalonych. Podłoże aktywne jest złożoną wielowarstwą epitaksjalną, w której za pomocą technologii przyrządowej (procesingu) możliwe jest wykonanie dyskretnych przyrządów takich jak: detektory typu PIN i MSM, źródła światła (LED, laser), modulatory optyczne, oraz zrealizowanie połączeń międzyelementowych i sprzęgania z włóknem światłowodowym.

ROZDZIAŁ II

Porównanie właściwości i parametrów fizykochemicznych związków podwójnych, potrójnych i poczwórnych (Ga, In) – (As, P).

2.1. Parametry strukturalne.

Związki półprzewodnikowe podwójne: arsenek galu, fosforek indu czy arsenek indu krystalizują w strukturze typu blendy cynkowej czyli sfalerytu (grupa przestrzenna $F43m$) (rys.2.1.). Są to dwie wzajemnie przenikające się sieci regularne typu F obsadzone atomami różnych pierwiastków. Struktura sfalerytu nie ma środka symetrii i tworzy sieć polarną z udziałem wiązań kowalencyjnych. Liczba kordynacyjna wynosi 4, przy czym atomy jednego składnika są otoczone tetraedrycznie przez atomy drugiego składnika i odwrotnie. Liczba atomów w komórce blendy cynkowej wynosi 32.



Rys. 2.1. Rozmieszczenie atomów w komórce elementarnej typu blendy cynkowej.

Związki potrójne, szczególnie te, których skład jest blisko środka przedziału ($x \sim 0,5$ dla $A_xB_{1-x}C$), mogą tworzyć w jednym z czterech kierunków krystalograficznych $\{111\}$ strukturę typu Cu–Pt (grupa przestrzenna $R3m$). W przypadku $In_xGa_{1-x}As$ ($x \sim 0,5$) struktura typu Cu–Pt była obserwowana przy wzroście epitaksjalnym metodą VPE na podłożu InP (001) [1]. Przy wzroście

metodą MBE na podłożu InP (110) obserwowano krystalizację $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x \sim 0,5$) w strukturze Cu–Au–I (grupa przestrzenna P4m2) w jednym z kierunków {100} [2,3]. Parametry sieciowe związków podwójnych, zależące od ciśnienia, temperatury i domieszek, zostały dokładnie określone i przedstawione w tabeli 2.1. Z porównania wynika, że różnice parametrów sieciowych między poszczególnymi związkami są w niektórych przypadkach duże, np. różnica między GaAs a InAs wynosi 6,7%. Dla związków potrójnych i poczwórnych parametr sieciowy zależy również od składu, co wpływa dodatkowo na niedopasowanie sieciowe materiału osadzanego względem podłoża. Z tego wynika, że łączenie związków w celu wytwarzania układów bardziej złożonych może się wiązać z dużymi ograniczeniami. Naprężenia występujące w warstwach takich związków mogą prowadzić do generacji defektów, a w skrajnym przypadku do degradacji struktury warstw. Wśród związków potrójnych interesującym z punktu widzenia zastosowań jest $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$, którego parametr sieciowy jest taki sam jak podłoża z InP. Daje to możliwość stosowania obu rodzajów materiałów w jednym przyrządzie bez specjalnych zabiegów technologicznych, jak ma to miejsce w przypadku innych składów stopu $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Wzory do obliczeń parametrów sieciowych związków potrójnych i poczwórnych mogą być wyznaczone przez interpolację parametrów związków podwójnych i potrójnych [4,5]:

– dla związków potrójnych $\text{A}_x\text{B}_{1-x}\text{C}$:

$$F_{ABC}(x) = x \cdot B_{AC} + (1-x) \cdot B_{BC} - x \cdot (1-x) \cdot E_{ABC} \quad (1)$$

– dla związków poczwórnych $\text{A}_x\text{B}_{1-x}\text{C}_y\text{D}_{1-y}$:

$$G_{ABCD}(x,y) = \frac{x \cdot (1-x) \cdot [y \cdot F_{ABC}(x) + (1-y) \cdot F_{ABD}(x)] + y \cdot (1-y) \cdot [x \cdot F_{ACD}(y) + (1-x) \cdot (1-x) \cdot F_{BCD}(y)]}{x \cdot (1-x) + y \cdot (1-y)} \quad (2)$$

W przypadku $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ wzór na parametr sieciowy, w zależności od składu, można uprościć praktycznie do funkcji liniowej:

$$a = 5,65325 + 0,4050 \cdot x \text{ [Å]} \quad (3)$$

Tabela 2.1. Wybrane parametry niektórych związków podwójnych AIIIBV[8].

Materiał	GaAs	InAs	InP	GaP
Parametr sieci a [Å]	5,6532	6,0583	5,8687	5,4505
Odległości międzyatomowe [Å]	2,44	2,62	2,54	2,36

Wyliczony z tej zależności parametr sieci jest na tyle dokładny, że można go

stosować przy projektowaniu struktur przyrządowych z obszarem czynnym na bazie związków $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$.

Obliczenie parametru sieci dla związku poczwórnego jest bardziej złożone (wzór 2.). Dla konkretnego stopu $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ zależność tą można uprościć do postaci:

$$a(x,y)=5,8688-0,4176\cdot x+0,1896\cdot y+0,0125\cdot y^2 \text{ [\AA]} \quad (4) [6]$$

2.2. Parametry fizyczne.

W tabeli 2.2. przedstawiono podstawowe parametry elektryczne i optyczne związków podwójnych.

Ze stopów potrójnych, których parametry można zmieniać w zakresie od jednego stopu podwójnego do drugiego, interesujący jest $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, w którym istnieje możliwość sterowania wartością energii przerwy zabronionej, a jednocześnie charakteryzujący się większą ruchliwością elektronów w porównaniu do związków podwójnych (GaAs, InP).

Stop poczwórny $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ zmienia swoje właściwości w zależności od składu, a zmiany wartości parametrów takich jak energia przerwy zabronionej i parametr sieci można prześledzić na rys. 2.2. Wyznaczenie wartości przerwy energetycznej (w eV) jest możliwe z następującej zależności:

$$E_{g,\text{dir}}(x,y)=1,35+0,668\cdot x-1,068\cdot y+0,758\cdot x^2+0,078\cdot y^2-0,069\cdot x\cdot y-0,322\cdot x^2\cdot y+0,03\cdot x\cdot y^2 \quad (5)$$

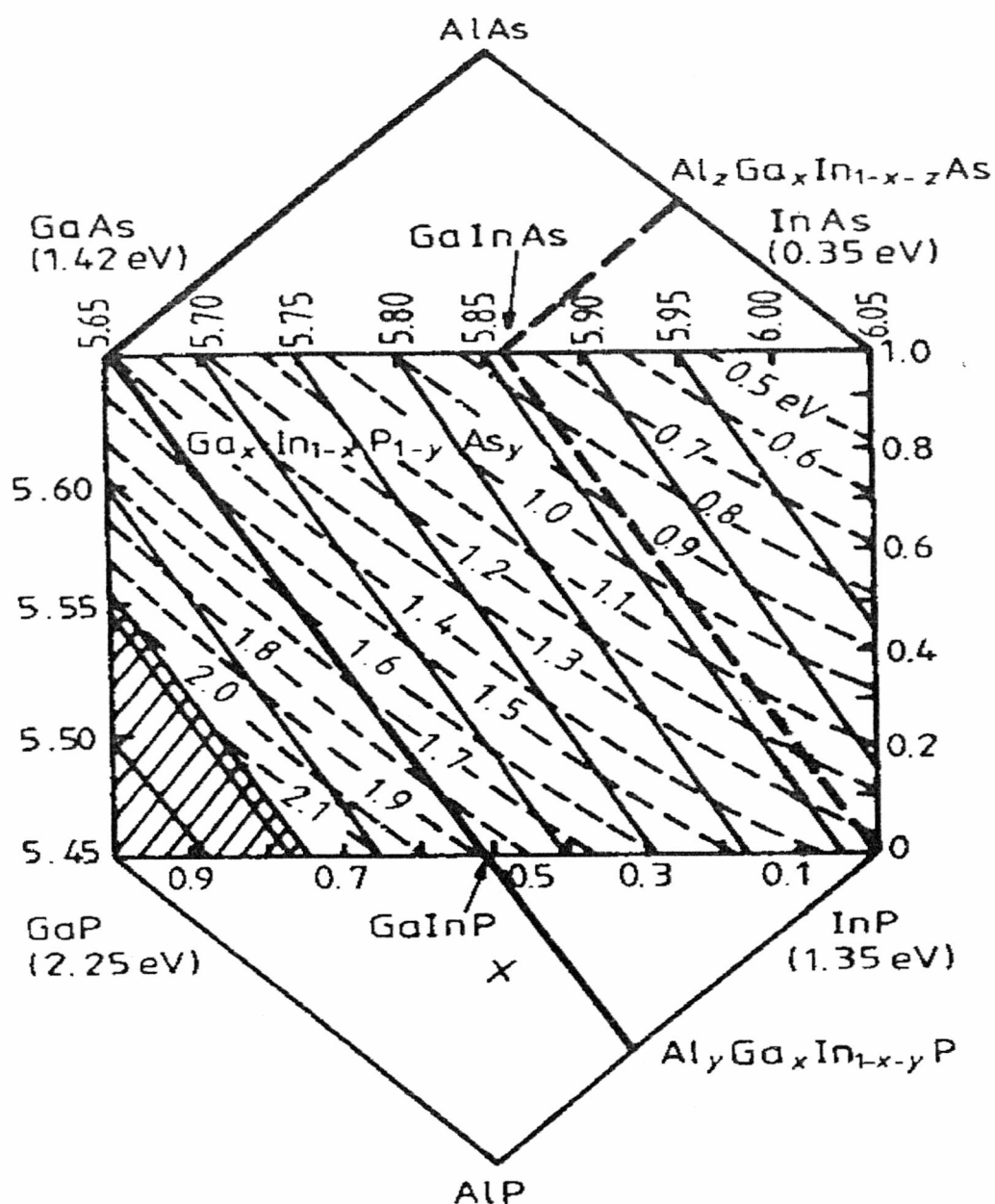
Tabela 2.2. Wybrane parametry elektryczne i optyczne związków podwójnych [7,8]

Parametry materiału	GaAs	InAs	InP	GaP
Struktura przejść optycznych	proste	proste	proste	skośne
Przerwa energetyczna [eV]	1,424(1)	0,354(3)	1,344	2,272
Ruchliwość elektronów [cm^2/Vs]	9200	30000	5900	160
Ruchliwość dziur [cm^2/Vs]	402	100–450	150	135
Stała dielektryczna $\epsilon(0)$	12,85	15,15	12,61	11,11
Stała dielektryczna $\epsilon(\infty)$	10,91	12,25	9,61	9,08
Współczynnik załamania światła n поблизу E_g	3,65	3,52	3,41	3,45

W tabeli 2.3. przedstawiono podstawowe parametry fizyczne i chemiczne związków podwójnych.

Tab. 2.3. Wybrane parametry fizyczne i chemiczne związków podwójnych AIIIBV.

Parametry materiału	GaAs	InAs	InP	GaP
Przewodność cieplna [W/mK]	44	40	70	1
Współczynnik rozszerzalności termicznej [10^{-6} K^{-1}]	6,86	4,52	4,75	4,5
Parametr sieci [Å]	5,6532	6,0583	5,8687	5,4505
Ciężar właściwy [g/cm^3]	5,32	5,67	4,81	4,14
Temperatura topnienia [$^{\circ}\text{K}$]	1513	1215	1335	1730



Rys. 2.2. Zależności parametrów stopu poczwórnego od jego składu. Linią ciągłą oznaczono parametr sieciowy [Å], linią przerywaną przerwę energetyczną [eV] [9].

2.3. Zalety i ograniczenia układu materiałowego (Ga, In) – (As, P).

2.3.1. Zalety.

Powszechnie stosowane podłoża GaAs i InP oraz warstwy dwuskładnikowe osadzone na tych podłożach nie zapewniają wykonania przyrządów optoelektronicznych pracujących w drugim i trzecim oknie telekomunikacyjnym (1300nm i 1550nm). Parametry materiałowe nie pozwalają stosować ich do wytwarzania obszarów czynnych takich jak MQW i supersieci. Dopiero zastosowanie związków potrójnych i poczwórnych daje takie możliwości.

Jednym z najbardziej interesujących materiałów potrójnych jest (In,Ga)As, który zapewnia odpowiednią przerwę energetyczną i dużą ruchliwość elektronów w nowoczesnych przyrządach optoelektronicznych. Jak wcześniej wspomniano (podrozdział 2.1.) dopasowanie sieciowe do podłoża InP wykazuje tylko potrójny stop $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$. Parametry optyczne pozwalają zastosować tę kombinację materiałów do wytwarzania przyrządów optoelektronicznych dla drugiego i trzeciego okna telekomunikacyjnego. Natomiast związek potrójny $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (dla $x < 0,3$) osadzany na podłożu GaAs jest stosowany w konstrukcji przyrządów optoelektronicznych dla fal o długości do 1100nm. Jednocześnie dodatek stopu InAs do GaAs zwiększa częstotliwość pracy przyrządów mikrofalowych, co związane jest z większą ruchliwością elektronów.

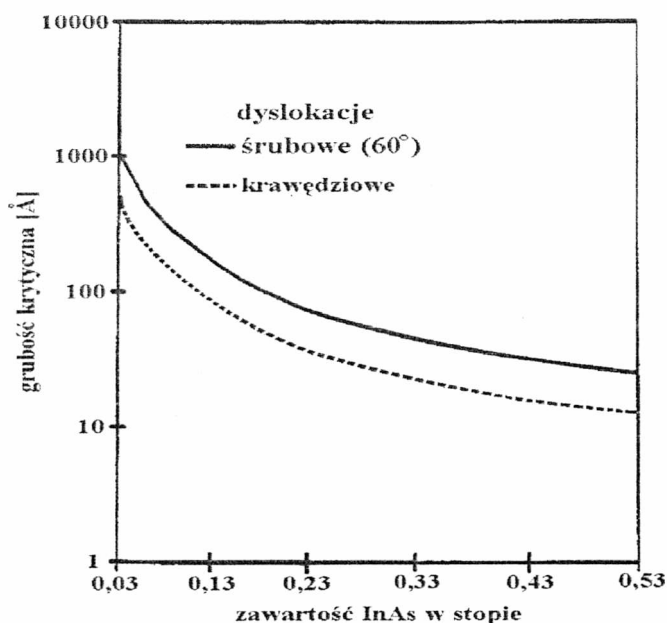
Związki poczwórne dopasowane sieciowo do podłoży GaAs i InP mogą mieć właściwości warstw ograniczających i barierowych i jako takie stosowane są w konstrukcjach nowoczesnych przyrządów z warstwami czynnymi z wielokrotnymi studniami kwantowymi. Technicznie jest to możliwe poprzez sterowanie składem takiego związku, jak to pokazano na rys. 2.2.

2.3.2. Ograniczenia technologiczne.

Najpoważniejszym ograniczeniem przy osadzaniu związków potrójnych i poczwórnych na podłożach związków binarnych jest duże niedopasowanie sieciowe tych związków. Interesujący autora układ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ wprowadza szereg trudności technologicznych. Wprowadzenie do arsenku galu stopu InAs pozwala projektować przyrządy półprzewodnikowe z obszarem czynnym o wartości przerwy energetycznej większej, niż jest to możliwe do osiągnięcia w układzie $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$. Wzrost zawartości InAs zwiększa ruchliwość elektronów w takich warstwach i zmniejsza równocześnie przerwę energetyczną półprzewodnika

złożonego. Dzięki temu można zastosować ten materiał jako warstwę aktywną w przyrządach optoelektronicznych dla bliskiej podczerwieni. Jednocześnie wraz ze wzrostem zawartości In zwiększa się parametr sieci. Różnice w parametrach sieci są na tyle duże, że ważną informacją przy projektowaniu przyrządów optoelektronicznych jest znajomość grubości krytycznej warstw $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ zależnej od składu układu trójskładnikowego.

Grubość krytyczna jest to grubość warstwy półprzewodnika, przy której naprężenia wewnętrzne spowodowane niedopasowaniem sieciowym są przyczyną generacji defektów niedopasowania (dyslokacje śrubowe i krawędziowe) (rys. 2.3.).



Rys. 2.3. Zależność grubości krytycznej od zawartości stopu InAs w związku $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ [10].

Prosty model (*continuum elasticity*) użyty przez Matthews'a do wyznaczenia grubości krytycznej przedstawiono w pracach [10,11]. Z modelu wynika, że na grubość krytyczną bardziej wpływają dyslokacje krawędziowe niż dyslokacje śrubowe. Jednak z drugiej strony, stwierdzono na podstawie badań mikroskopowych [12,13], że w strukturze blendy cynkowej dominujące są dyslokacje śrubowe, ponieważ płaszczyzna propagacji {111} jest dla nich uprzywilejowana, a głównym kierunkiem propagacji jest kierunek $\langle 110 \rangle$. Dlatego można przyjąć, że dyslokacje śrubowe są bardziej krytyczne w technologii warstw InGaAs i to one będą decydować o ich jakości strukturalnej. Rys. 2.3. przedstawia wykres zależności grubości krytycznej od zawartości stopu InAs w związku potrójnym $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Dla interesujących nas zastosowań, warstwy $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$ mogą mieć grubość nie większą niż 10nm. Ten wynik jest prawdziwy dla układu

z pojedynczą warstwą (In,Ga)As. Dla układu z wielokrotnymi studniami kwantowymi grubość ta może być zdecydowanie większa. Jest to związane z dwuosiowymi naprężeniami ściskającymi, które występują po obu stronach warstwy (In,Ga)As.

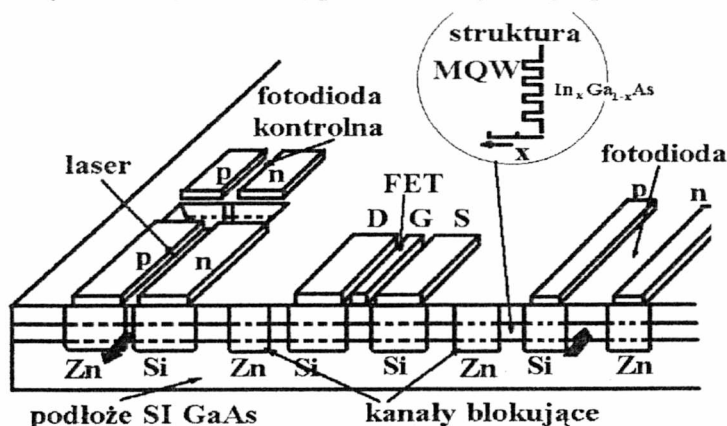
ROZDZIAŁ III

Metody wytwarzania oraz zastosowanie epitaksjalnych heterostruktur (Ga, In) – (As, P).

Technologie epitaksjalnego osadzania warstw związków AIII BV umożliwiają wytwarzanie struktur zarówno optoelektronicznych jak i mikroelektronicznych. Celem współczesnych zastosowań jest integracja obu rodzajów przyrządów w jednym układzie scalonym. Aby to osiągnąć potrzebne jest opracowanie reguł projektowania i wytwarzania tzw. podłoża aktywnego, na którym w kolejnych etapach procesu technologicznego osadzone będą odpowiednie warstwy stanowiące podstawę do wykonania elementów układów scalonych. Podstawowe wymagania stawiane takim podłożom to:

- jednorodność grubości i składu wielowarstwy na średnicy 4 cali (OEIC, MOMIC),
- atomowa gładkość granic rozdziału warstw,
- dobra jakość strukturalna,
- jednorodność właściwości optycznych,
- zgodność z istniejącymi procesami technologii przyrządowej:
 - wykonanie kontaktów omowych i Schottky'ego,
 - pasywacja powierzchni,
 - elektryczna izolacja przyrządów,
 - profilowanie trójwymiarowe,
- możliwość realizacji połączeń elektrycznych i optycznych przyrządów wewnątrz podłoża aktywnego i na zewnątrz układu scalonego.

Przykładową strukturę podłoża aktywnego pokazano na rysunku 3.1.



Rys. 3.1. Struktura podłoża aktywnego i układu OEIC.

3.1. Metody wytwarzania heterostruktur epitaksjalnych (Ga, In) – (As, P).

Podstawowymi metodami wytwarzania warstw związków AIIIBV są techniki epitaksjalne takie jak:

- LPE (Liquid Phase Epitaxy – epitaksja z fazy ciekłej),
- VPE (Vapour Phase Epitaxy – epitaksja z fazy gazowej),
- MOVPE (MetalOrganic Vapour Phase Epitaxy – epitaksja z fazy gazowej z zastosowaniem związków metaloorganicznych),
- MBE (Molecular Beam Epitaxy – epitaksja z wiązek molekularnych).

Dla wszystkich tych metod należy sprecyzować zarówno ograniczenia technologiczne jak i zalety w stosunku do pozostałych. Krótkie porównanie podstawowych parametrów różnych technik epitaksji zamieszczono w tabeli 3.1.

Tabela 3.1. Podstawowe parametry technik wytwarzania heterostruktur AIIIBV.

Parametr/ technika	LPE	VPE	MOVPE	MBE
koszt	niski	niski	wysoki	bardzo wysoki
materiały	wszystkie	bez Al	wszystkie	bez P
czystość	średnia	bardzo wysoka	wysoka	wysoka
jednorodność wzrostu	niska	wystarczająca	wystarczająca	dobra
wydajność	mała	średnia	wysoka	średnia
jakość międzywarstw	słaba	wystarczająca	dobra	bardzo dobra
powtarzalność	wystarczająca	dobra	bardzo dobra	najwyższa
kontrola in-situ	–	trudna	średnia	dobra
bezpieczeństwo	duże	duże	małe	duże

Ze względu na możliwości technologiczne wykonywania struktur niskowymiarowych do najważniejszych technik wytwarzania heterostruktur związków AIIIBV zaliczamy MBE i MOVPE. Dlatego w dalszej części pracy skoncentrowano się na omówieniu tylko dwóch techniki epitaksjalnych.

3.1.1. MBE.

MBE – epitaksja z wiązek molekularnych, jest techniką pozwalającą kształtować wzrost w szerokim zakresie składów i grubości niskowymiarowych heterostruktur związków AIIIBV [14,15,16]. Proces wzrostu odbywa się w ultra-wysokiej próżni (UHV – Ultra High Vacuum) przy ciśnieniu rzędu 10^{-9} Pa. Wiązki molekularne wytwarzane są w komórkach efuzyjnych Knudsenów utrzymywanych w podwyższonych temperaturach i wyposażonych w mechaniczne przesłony.

Pierwiastki stosowane w MBE to: Ga, In, Al jako źródła grupy III, As jako źródło grupy V i Si jako domieszka typu n. Beryl stosowany jest jako domieszka typu p. Podłoże, na którym następuje krystalizacja jest grzane do temperatury kilkuset stopni Celsjusza (w zależności od składu chemicznego otrzymywanej warstwy). Aby otrzymać warstwy o dużej czystości, w komorze utrzymywana jest wysoka próżnia dzięki pompom turbomolekularnym i jonowym. Dodatkowe pompowanie odbywa się za pomocą sublimatorów tytanowych i kriopaneli (chłodzonych ciekłym azotem).

Duża precyzja w sterowaniu wiązkami molekularnymi zapewnia otrzymywanie warstw niskowymiarowych o dobrze określonym składzie i grubości, a także dużej powtarzalności. Typowe szybkości wzrostu warstw dochodzą do $1\mu\text{m/h}$. W czasie wzrostu możliwa jest kontrola procesu metodą RHEED, układ sprzężony jest z komputerem sterującym tym procesem. Jedynym poważniejszym ograniczeniem metody jest niemożliwość osadzania związków zawierających fosfor ze względu na jego duże ciśnienie cząstkowe. W zależności od rodzaju podłoża możliwe jest stosowanie różnych związków z glinem np.: $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. W przypadku stosowania podłoża InP, warstwy z większą przerwą energetyczną i dopasowaniem sieciowym zapewnia $\text{Al}_{0,48}\text{In}_{0,52}\text{As}$ [17,18,19,20]. Dla podłoża GaAs możliwe jest stosowanie związków $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ w całym zakresie składów, a $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ dla parametru $x=0,15 \div 0,25$ [21]. Pochodne techniki MBE jak: MOMBE (MetalOrganic MBE), GSMBE (Gas Source MBE) i CBE (Chemical Beam Epitaxy), umożliwiają już epitaksję związków zawierających fosfor [14,22,23].

3.1.2. MOVPE.

MOVPE – epitaksja z fazy gazowej z zastosowaniem związków metaloorganicznych pozwala otrzymywać niskowymiarowe heterostrukture związków AIIIBV w tym stopy zawierające fosfor [24,25]. Proces wzrostu odbywa się w reaktorze, w systemie rury otwartej, pod ciśnieniem atmosferycznym lub obniżonym (LPMOVPE – Low Pressure MOVPE) do $50 \div 100\text{Tr}$. Źródłami pierwiastków III grupy układu okresowego są związki metaloorganiczne:

- TMGa – trimetylek galu,
- TMIIn – trimetylek indu,
- TEGa – trietylek galu,
- TEIn – trietylek indu,

Natomiast źródłami pierwiastków V grupy układu okresowego są głównie wodorki:

- AsH_3 – arsenowodór,
- PH_3 – fosforowodór.

Źródłami domieszek są zarówno związki metaloorganiczne:

- DEZn – dietylen cynku – typ p,
- DMZn – dimetylen cynku – typ p,

jak i wodorki:

- H_2S – siarkowodor – typ n,
- SiH_4 – silan – typ n,
- H_2Se – selenowodor – typ n.

Różne rodzaje domieszek stosowanych w tej technice opisano szczegółowo w [26]. Ze względu na dużą wybuchowość i toksyczność wodorków, jako źródła pierwiastków grupy V stosowane są często związki metaloorganiczne. Zamiast bardzo wybuchowego i łatwopalnego PH_3 używany jest TBP – tertiarybutylo fosfor, który ma podobne parametry pyrolizy jak AsH_3 . Pozwala to otrzymywać lepsze pod względem strukturalnym warstwy w porównaniu do układu klasycznego AsH_3/PH_3 [27].

Szybkość reakcji pyrolizy silnie zależy od temperatury podłoża. W zależności od ciśnienia w reaktorze i rodzaju osadzanego związku stosuje się temperatury od 600 do 700°C. Typowe szybkości wzrostu warstw dochodzą do 1÷2 μm/h. Mimo, że technika ta pozwala uzyskać struktury niskowymiarowe, to jednak ze względu na warunki prowadzenia procesu (temperatura, ciśnienie) otrzymywane warstwy są gorszej jakości niż wykonane techniką MBE.

3.2. Możliwości aplikacji heterostruktur (Ga, In)–(As, P).

Heterostruktury epitaksjalne (Ga, In)–(As, P) stosowane są obecnie w wielu przyrządach optoelektronicznych i mikrofalowych takich jak:

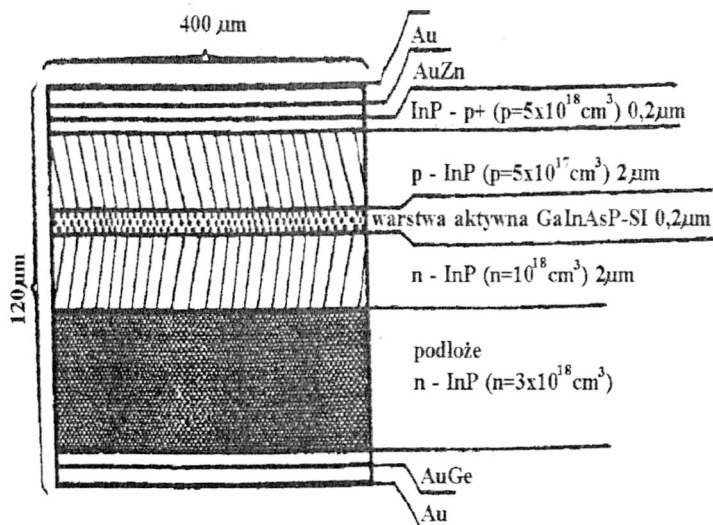
- diody elektroluminescencyjne i laserowe,
- detektory PIN, MSM,
- tranzystory polowe mikrofalowe,
- fotoodbiorniki.

3.2.1. Diody elektroluminescencyjne i laserowe.

Diody laserowe dla zakresu długości fali emitowanej $\lambda=1,3\div1,55\mu\text{m}$ (II i III okno telekomunikacyjne) wykonywane są na podłożu InP. Osadzane warstwy epitaksjalne są dopasowane sieciowo do tego podłoża, upraszcza to etap projektowania takich przyrządów. W tym układzie materiałowym wykonywane są następujące rodzaje diód:

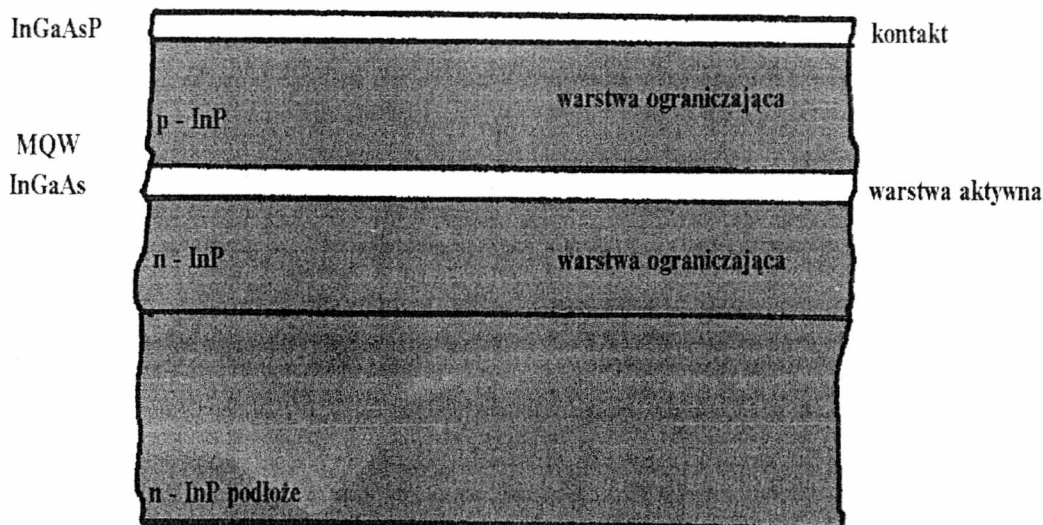
3.2.1.a. Laser DH.

DH laser (Double Heterostructure – z dwoma heterozłączami) (rysunek 3.2.), gdzie obszarem aktywnym jest warstwa InGaAsP o składzie dobranym do długości



Rys. 3.2. Przykładowa struktura diody laserowej DH.

emitowanej fali ($1,55\mu\text{m}$ – $\text{Ga}_{0,37}\text{In}_{0,63}\text{As}_{0,8}\text{P}_{0,2}$, $1,3\mu\text{m}$ – $\text{Ga}_{0,25}\text{In}_{0,75}\text{As}_{0,5}\text{P}_{0,5}$) [28]. Lasery takie mogą pracować zarówno w trybie impulsowym, jak i z ciągłą emisją promieniowania. Zastosowanie związku potrójnego InGaAs, dopasowanego sieciowo do podłoża, jako warstwy aktywnej, upraszcza technologię wykonywania lasera, jednakże ogranicza zakres jego pracy do długości emitowanej fali ($\lambda = 1,55\mu\text{m}$). Ponieważ obszar, z którego następuje emisja jest gruby (grubość $0,2 \div 0,5\mu\text{m}$), to prąd progowy jest duży, a straty optyczne związane z taką konstrukcją są znaczne [29]. Aby ograniczyć obie wartości wykonuje się lasery z obszarem

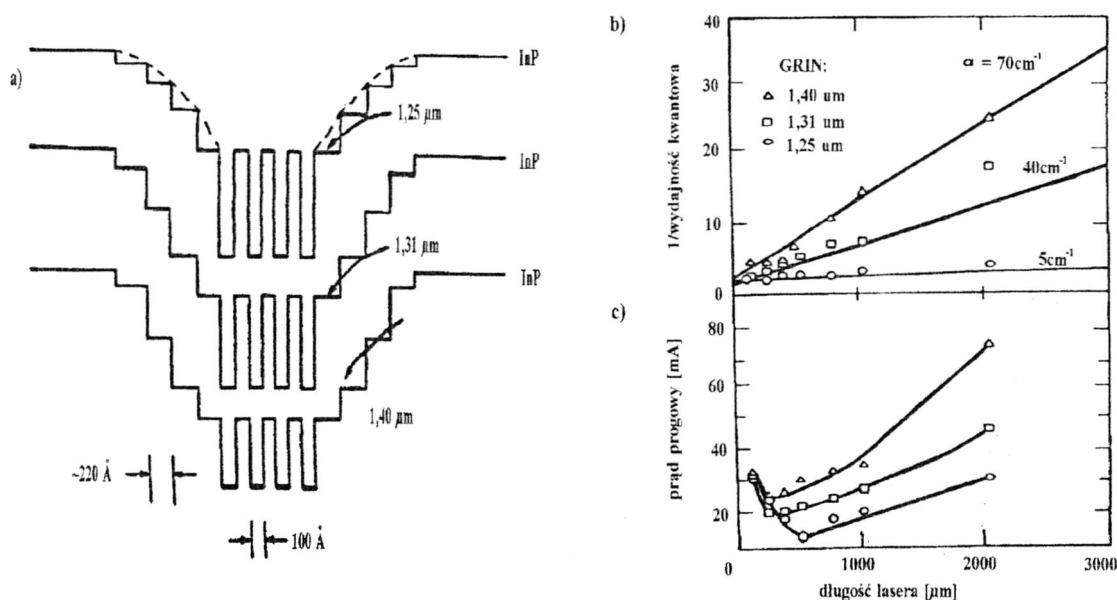


Rys. 3.3. Przykładowej struktura diody MQW.

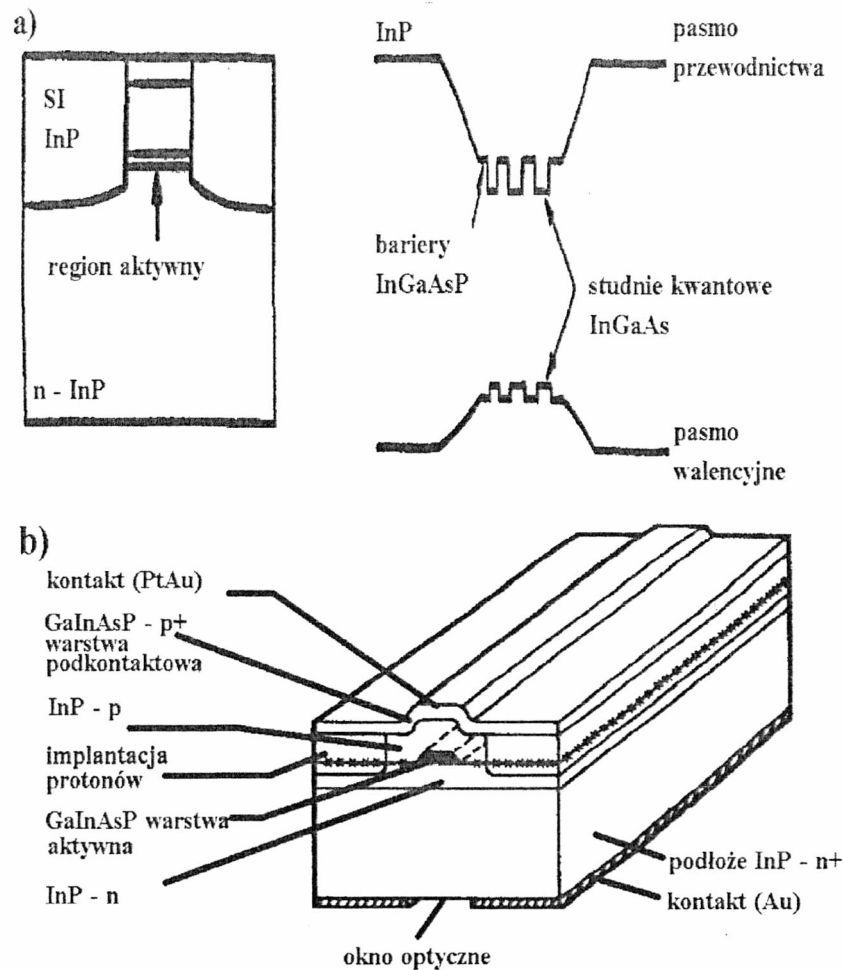
czynnym typu SQW (Single Quantum Well – pojedyncza studnia kwantowa) i MQW (Multiple Quantum Well – wielokrotna studnia kwantowa) (rys.3.3) [30,31].

3.2.1.b. Lasery z pojedynczą i wielokrotną studnią kwantową.

Oprócz wspomnianych wyżej właściwości, lasery ze studniami kwantowymi mają jeszcze jedną zaletę: możliwość określenia długości emitowanej fali poprzez zaprojektowanie parametrów obszaru aktywnego takich jak szerokość studni kwantowej i wysokość bariery. Sterowanie położeniem poziomów energetycznych w studniach kwantowych umożliwia zmianę długości emitowanej fali w granicach $1,3 \div 1,55 \mu\text{m}$ [32]. Ponieważ obszar aktywny (QW) jest bardzo cienki ($2 \div 10 \text{nm}$), to dla zwiększenia prawdopodobieństwa rekombinacji i ograniczenia strat świetlnych w nowych konstrukcjach wprowadzono warstwy ze zmiennym współczynnikiem załamania (GRIN – GRaded Index) [33] (rysunek 3.4.a.). Lasery tego typu charakteryzują się mniejszymi wartościami prądów progowych i jednocześnie większą mocą emitowanego światła. Wykresy zależności prądu progowego i odwrotności sprawności kwantowej od długości rezonatora pokazano na rysunku 3.4.b i c. W różnych obszarach GRIN stwierdzono [34], że przy mniejszej różnicy wartości przerwy energetycznej między barierą, a studnią prąd progowy jest mniejszy a sprawność kwantowa większa. Istnieje optymalna długość rezonatora, której odpowiada minimalny prąd progowy i maksymalna sprawność kwantowa. Dla ograniczenia emisji światła w płaszczyźnie równoległej do podłoża wykonuje się struktury BH (Burried Heterostructure – z zagrzebaną heterostrukturą) [35].



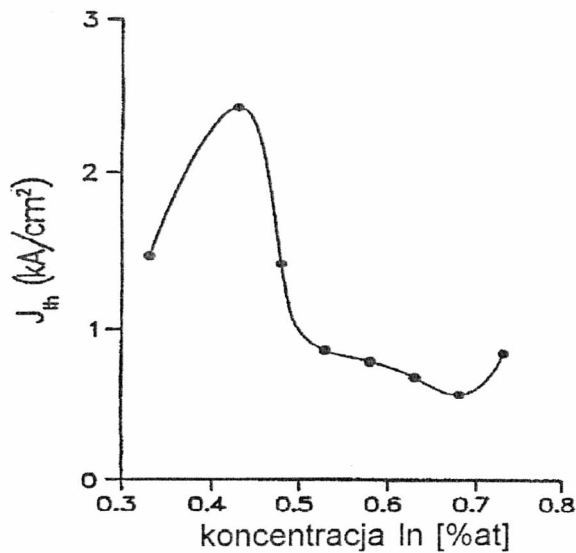
Rys. 3.4. Schemat trzech obszarów GRIN MQW: a) zmiana szerokości przerwy wzbronionej bariery od $1,25 \mu\text{m}$ do $1,40 \mu\text{m}$. Zależność odwrotności sprawności kwantowej (b) i prądu progowego (c) od długości rezonatora [34].



Rys. 3.5. Schematy diód laserowych typu BH: a) z warstwą niedomieszkowaną, b) z warstwą implantowaną.

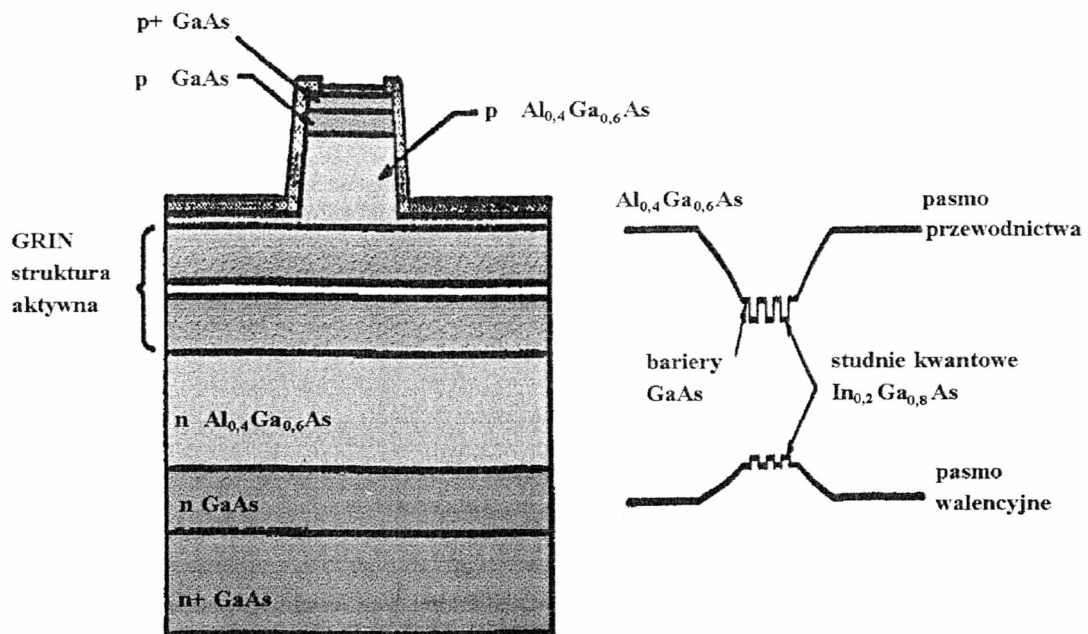
Ograniczenie może być realizowane poprzez wytrawienie warstwy epitaksjalnej z boków rezonatora i osadzenie warstwy niedomieszkowanej (rysunek 3.5.a), poprzez implantację protonów do warstwy podkontaktowej (rysunek 3.5.b.) lub poprzez wytrawienie warstwy ograniczającej i osadzenie warstwy dielektrycznej Si_3N_4 lub SiO_2 (ridge waveguide – laser paskowy z rezonatorem grzbietowym) [36,37,38].

Obniżenia prądu progowego uzyskuje się w laserach MQW z naprężonymi studniami kwantowymi [39]. Przy zawartości indu w studni $x < 0,53$ warstwa jest rozciągana, a przy $x > 0,53$ ściskana. W strukturach ze studniami ściskanymi uzyskano 25% zmniejszenie prądu progowego w porównaniu z analogicznymi laserami ze studniami dopasowanymi [40]. Wykres zależności prądu progowego w funkcji zawartości indu w naprężonej studni kwantowej pokazano na rysunku 3.6. [41]. Dzięki warstwom zawierającym więcej indu uzyskuje się zmniejszenie prądu progowego. Jest to związane z przesunięciem pasma dziur lekkich i ciężkich w wyniku występowania naprężeń ściskających.



Rys. 3.6. Gęstość prąd progowego w funkcji zawartości In [41].

Zastosowanie na podłoża arsenku galu daje możliwość wykonania laserów MQW z zawartością In $x < 0,3$. Przykładowa struktura pokazana jest na rysunku 3.7. Wraz ze zwiększaniem zawartości indu, przy stałych wymiarach studni, zwiększa się długość emitowanej fali. Jednocześnie zwiększa się niedopasowanie sieciowe i wzrastają naprężenia.

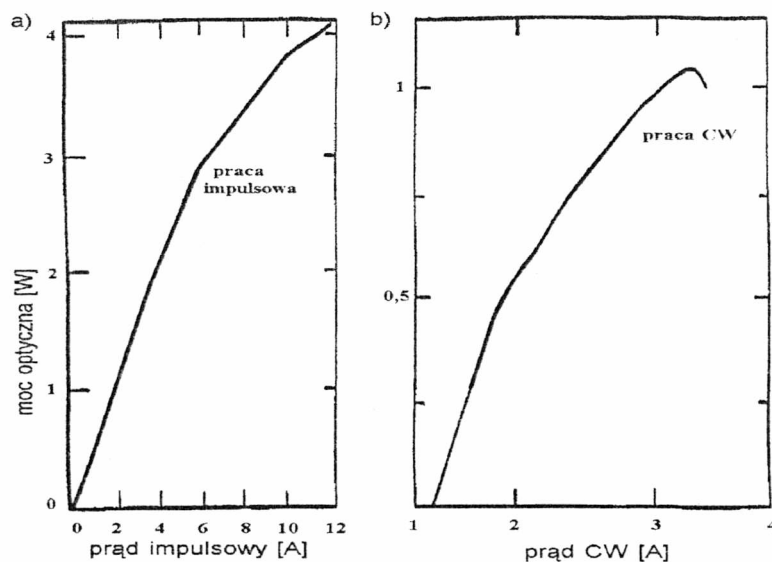


Rys. 3.7. Przykładowa struktura lasera MQW osadzona na podłożu GaAs.

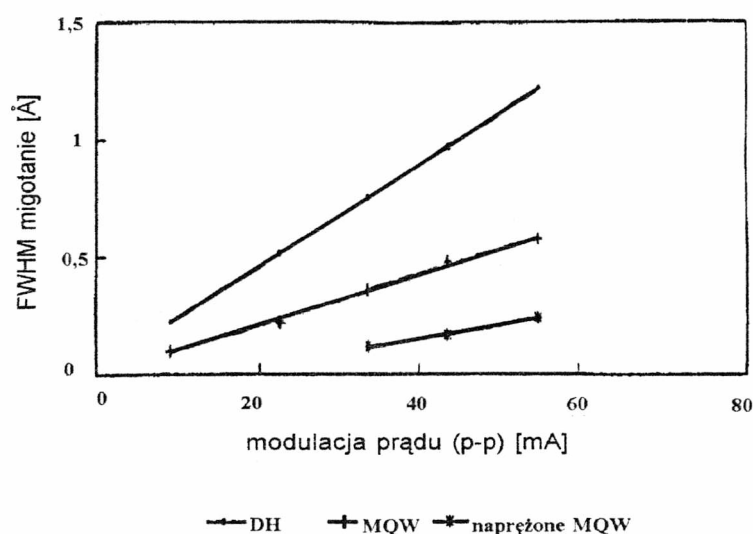
Może to powodować dodatkowo zwiększoną generację dyslokacji niedopasowania. Dlatego na podłożach z GaAs nie wykonuje się laserów MQW z większą zawartością In niż 30%. Najbardziej interesującą konstrukcją jest laser

emitujący falę świetlną o długości $\lambda=980\text{nm}$ ($x\sim 0,2$), który zastosowany jest jako źródło światła pompującego wzmacniacza światłowodowego domieszkowanego erbem (EDFA – Erbium Doped Fiber Amplifier – wzmacniacz światłowodowy domieszkowany erbem) [37]. Wytworzono jednomodowy laser o mocy wyjściowej 200mW pracy ciągłej, linijki takich laserów miały moc wyjściową większą niż 4W przy pracy impulsowej i 1W przy pracy ciągłej (rysunek 3.8.).

Również migotanie laserów DH i MQW (ze studniami nienaprzężonymi) jest większe niż laserów ze studniami naprzężonymi. Rezultaty pomiarów dla modulacji



Rys. 3.8. Zależność mocy optycznej linijki laserowej od prądu dla pracy impulsowej (a) i pracy ciągłej (b) [42].



Rys. 3.9. Zależność migotania laserów w funkcji modulacji prądu [43].

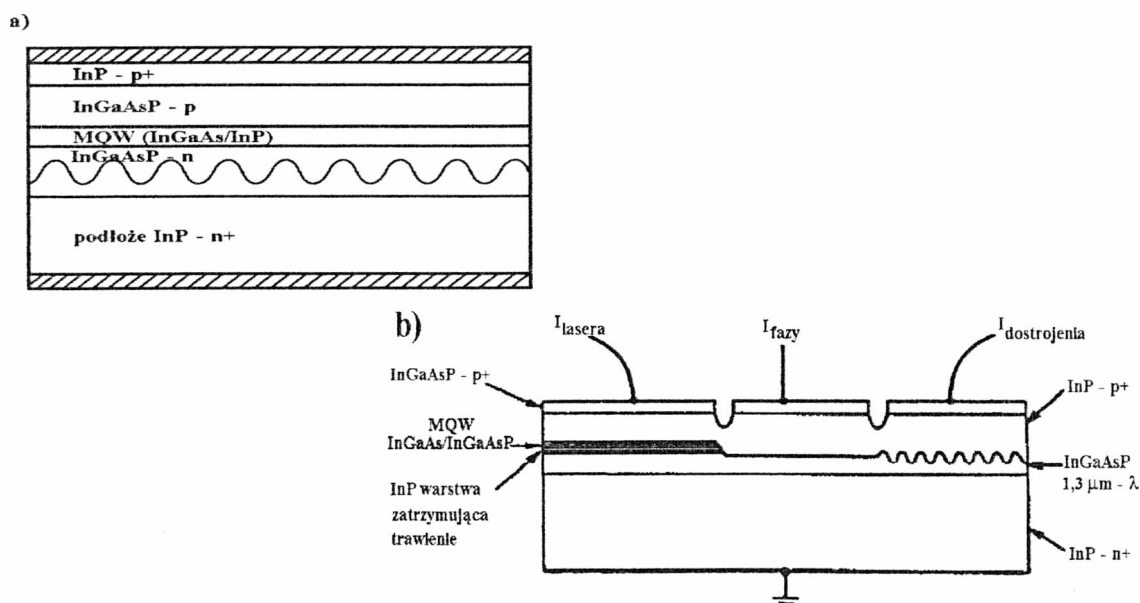
1Gb/s pokazano na rysunku 3.9. Lasery z naprężonym obszarem czynnym (InGaAs/GaAs) charakteryzują się najmniejszym migotaniem, a lasery typu DH największym. Zwiększa to znacznie możliwości zastosowań takich laserów w telekomunikacji światłowodowej.

3.2.1.c. Lasery DFB i DBR.

Do zastosowań telekomunikacyjnych niezbędnym jest wytworzenie laserów jednomodowych pracujących w zakresie bardzo wysokich częstotliwości. Lasery pracujące z jednym modem podłużnym emitowanej fali świetlnej są projektowane tak, aby nie było potrzeby stosowania zewnętrznych filtrów, a selekcja fali o jednej długości następowała już w strukturze epitaksjalnej. W laserach DFB (Distributed FeedBack – laser z rozłożonym sprzężeniem zwrotnym) obszar sprzężenia fali świetlnej realizuje się poprzez wytrawienie zdefiniowanych rowków w warstwie epitaksjalnej [44,45]. Następnie osadza się pozostałe warstwy epitaksjalne. Obszar sprzężenia znajduje się w pobliżu obszaru aktywnego na całej długości przyrządu – rysunek 3.10.a. Prace nad tymi laserami prowadzono wykorzystując różne techniki:

- technologię LPE [46],
- technologię mieszaną MBE i LPE [47],
- technologię mieszaną LPE i MOVPE [48].

Takie usytuowanie sprzężenia umożliwia pracę lasera w trybie jednomodowym. Jednak łatwiejszym do wytworzenia i dającym dodatkowe możliwości jest laser DBR (Distributed Bragg Reflector – laser ze zwierciadłem bragowskim) – rys. 3.10.b. [49]. Obszar wzmocnienia jest wytworzony obok obszaru aktywnego i jego wytrawienie nie wpływa na osadzane później warstwy studni kwantowych.



Rys. 3.10. Przykładowe struktury laserów a) DFB i b) DBR.

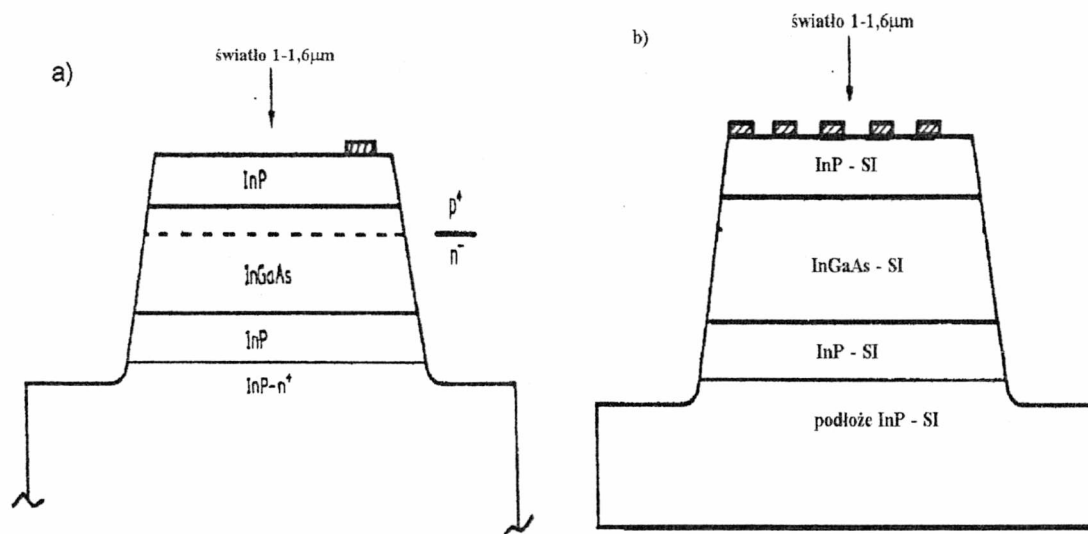
Dodatkowo między tymi obszarami znajduje się światłowód planarny. Poprzez zmianę wartości prądu (ilość nośników wpływa na zmianę współczynnika załamania) płynącego wskroś światłowodu i lustra Bragga możliwe jest dostrojenie lasera podczas pracy [50].

3.2.2. Detektory PIN i MSM.

Detektory PIN bliskiej podczerwieni (długość fali $\lambda = 1,0 \div 1,6 \mu\text{m}$) wykonywane są z $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ na podłożu InP. Związek potrójny InGaAs jest dopasowany sieciowo do InP, a jego przerwa energetyczna wynosi 0,75eV. Odpowiada to długofalowej krawędzi absorpcji równej $1,6 \mu\text{m}$. Przy projektowaniu tego typu detektorów warstwa aktywna musi być odpowiednio gruba ($3 \div 5 \mu\text{m}$) a dzięki dopasowaniu sieciowemu nie występuje zjawisko relaksacji. Przykładową konstrukcję detektora PIN InGaAs/InP pokazano na rysunku 3.11.a [51]. Dioda zbudowana jest z trzech nieodomieszkowanych warstw osadzonych na podłożu InP(n+). Są to:

- warstwa buforowa InP,
- warstwa aktywna InGaAs,
- warstwa podkontaktowa InP, jednocześnie stanowiąca okno dla detekowanego promieniowania.

Warstwa domieszkowana p+, wytworzona poprzez dyfuzję cynku, znajduje się w warstwie InGaAs [52]. Struktura mesa jest trawiona chemicznie. Taka konstrukcja zapewnia detekcję promieniowania w zakresie długości fali od $1 \mu\text{m}$ do $1,6 \mu\text{m}$ przy częstotliwości pracy powyżej 150GHz.



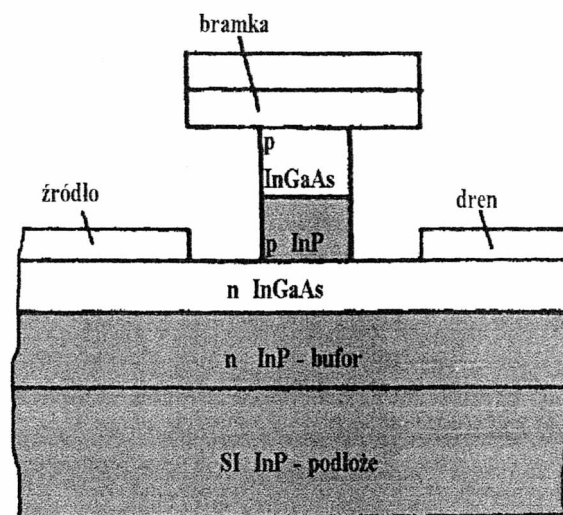
Rys. 3.11. Przykładowe struktury detektorów PIN (a) i MSM (b) [51].

Drugim typem detektora bliskiej podczerwieni jest detektor MSM – rys.3.11.b. Konstrukcja tego przyrządu jest prostsza technologicznie, a możliwe częstotliwości pracy większe niż detektorów PIN. Przyrząd wykonuje się technologią planarną. Ułatwia to integrację z innymi przyrządami np. z tranzystorem FET czy światłowodem planarnym [53].

3.2.3. Polowe tranzystory mikrofalowe.

Fosforek indu jest również bardzo dobrym materiałem do wytwarzania diod mikrofalowych, które mogą pracować do 200GHz, co daje szerokie możliwości stosowania ich np. w telekomunikacji satelitarnej i radarach. Diody Gunna wykonane z InP mają większy zakres częstotliwości pracy niż diody z GaAs (100GHz przy 3dB paśmie) [55].

Osadzanie warstw związków potrójnych InGaAs na podłożu InP zwiększa jeszcze możliwości zastosowania przyrządów wykonanych z tych materiałów. Warstwa dopasowana sieciowo do InP może służyć jako kanał tranzystora polowego, który może być wykonany na jednym podłożu z fotodetektorem PIN lub



Rys. 3.12. Schemat tranzystora JFET na podłożu InP [54].

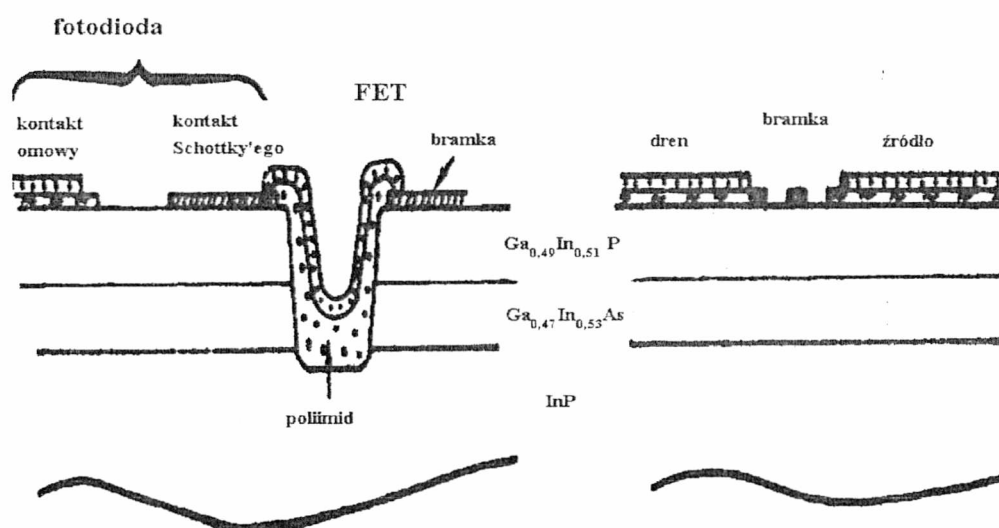
MSM. Schemat tranzystora JFET pokazano na rys. 3.12.

Ponieważ warstwa $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ ma zbyt małą przerwę zabronioną, to dla realizacji kanału tranzystora stosowane są różne metody wytworzenia bramki:

- osadzanie materiału z większą przerwą wzbronioną np InAlAs, InP [56],
- osadzanie bramki na izolatorze Si_3N_4 [57],
- wykonanie złączy p–n metodą dyfuzji [58,59], implantacji [60] lub epitaksji warstwy typu p [54].

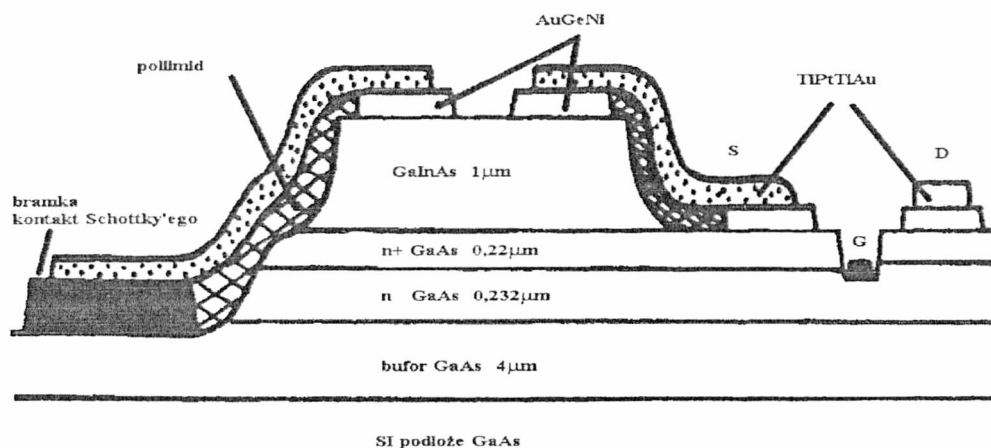
3.2.4. Fotoodbiorniki.

Dzięki możliwości zastosowania tego samego rodzaju podłoża, szybkie tranzystory FET i różne typy detektorów mogą być wytworzone w jednym procesie technologicznym. Integracja dwóch różnych przyrządów (mikrofalowych i optoelektronicznych) ułatwia spełnianie wymagań współczesnej telekomunikacji światłowodowej. Najprostszym sposobem wytworzenia fotoodbiornika jest zastosowanie podłoża InP i dopasowanych do niego sieciowo warstw epitaksjalnych $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/\text{In}_{0,51}\text{Ga}_{0,49}\text{P}$. Przykładową realizację pokazano na rys.3.13. Warstwa

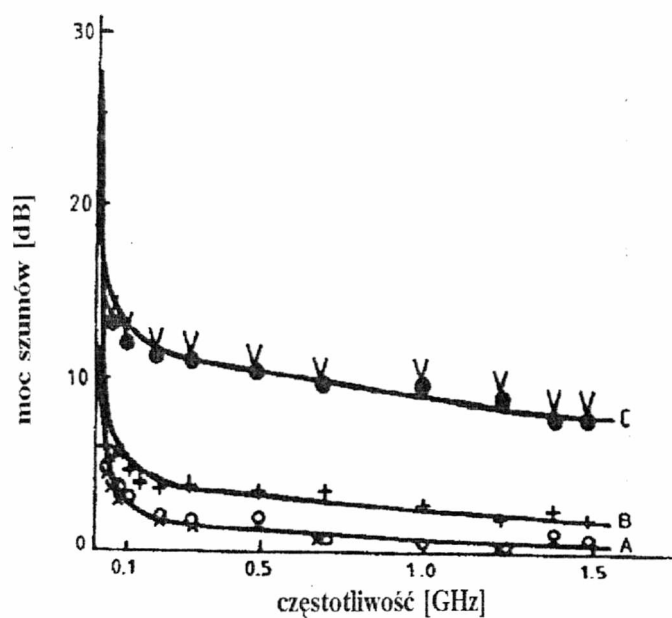


Rys. 3.13. Przykładowa struktura fotoodbiornika na podłożu InP.

$\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ o grubości 200 nm jest aktywną częścią fotodetektora. Jednocześnie ze względu na niski poziom domieszkowania ($2 \cdot 10^{17} \text{cm}^{-3}$) może być kanałem tranzystora FET. Warstwa podkontaktowa InGaP zapewnia prawidłowe wykonanie kontaktów Schottky'ego i omowych. Na przykład czułość fotodetektora $40 \times 40 \mu\text{m}$ była na poziomie $0,1 \text{AW}^{-1}$ dla detekowanej fali $1,3 \mu\text{m}$ [61]. Drugim materiałem wykorzystanym na podłożu jest GaAs, na którym również możliwa jest integracja obu przyrządów. Przykładową realizację pokazano na rys.3.14. Zastosowano niedomieszkowane podłoże GaAs, na którym osadzono bufor z niedomieszkowanego GaAs, a na nim warstwę typu n dla tranzystora. Dopiero na tych warstwach osadzono zrelaksowaną warstwę fotodetektora InGaAs. Dla częstotliwości pracy mniejszych od 100MHz szumy 1/f są duże ($>30\text{dB}$), ale dla wyższych ($>100\text{MHz}$) maleją do wartości mniejszych od 10dB (rys.3.15)[62].



Rys. 3.14. Przykładowa struktura fotoodbiornika na podłożu GaAs.



Rys. 3.15. Zależność szumów od częstotliwości pracy fotoodbiornika: A) fotodetektor, B) FET, C) fotoodbiornik [62].

3.3. Wnioski.

Z analizy, z konieczności skrótu, przedstawionej w poprzednich rozdziałach wynika, że związki półprzewodnikowe (In, Ga) (As, P) którymi autor się zajmuje należą do grupy materiałów często stosowanych we współczesnych przyrządach mikro- i optoelektronicznych. Zbadanie korelacji między

charakterystykami złożonych struktur epitaksjalnych, a parametrami procesu epitaksji i dążenie do precyzyjnego sterowania procesami domieszkowania tych struktur jest najważniejszym zadaniem w tej rozprawie. Zaś przykłady praktycznej realizacji różnych przyrządów są dowodem właściwej interpretacji wyników badań i ich wykorzystania.

ROZDZIAŁ IV

Konstrukcja laboratoryjnego stanowiska badawczego MOVPE.

Badanie warunków osadzania $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ na podłożu GaAs autor wykonał na stanowisku MOVPE, które zaprojektowano i zbudowano w Instytucie Techniki Mikrosystemów Politechniki Wrocławskiej w ramach PBZ 101-01-12. W omawianym urządzeniu zastosowano reaktor AIX200 R&D firmy AIXTRON. Umożliwia ono jednoczesne stosowanie czterech źródeł metaloorganicznych i trzech gazowych. Górna temperatura pracy wynosi 840°C . Dzięki zastosowaniu radiacyjnego grzania podstawy grafitowej możliwe jest szybkie grzanie i studzenie podłoża. Autor jest jednym z głównych konstruktorów i wykonawców tego stanowiska.

4.1. Układ gazowy – dozownik gazów i reagentów.

4.1.1. Konfiguracja dozownika.

Zastosowano konfigurację "VENT – RUN" polegającą na oddzielnym podawaniu gazów do dwóch części dozownika (rys.4.1.). Taka topologia połączeń linii gazowych umożliwia niezależne sterowanie przepływów gazów w części "reaktorowej" i "wyciągowej", co w konsekwencji wpływa na poprawę stabilizacji przepływów. Do dokładnego kontrolowania ciśnienia w saturatorach ze związkami metaloorganicznymi zastosowano kontrolery ciśnienia (PC – Pressure Controller – sterownik ciśnienia) produkcji firmy Bronkhorst o gwarantowanej szczelności helowej ($10^{-9}\text{cm}^3/\text{s}$ przy ciśnieniu atmosferycznym i temperaturze normalnej) [63]. Oprócz czterech kontrolerów ciśnienia (jeden dla każdego związku metaloorganicznego) dozownik zawiera 18 kontrolerów przepływu masy (MFC – Mass Flow Controller – regulator przepływu masy) w tym: 1 firmy Brooks, 4 firmy Bronkhorst i 13 firmy MKS Instruments. W skład instalacji gazowej wchodzi 22 zawory pneumatyczne produkcji firmy Qualiflow, 16 sterujących nimi zaworów elektromagnetycznych oraz 10 zaworów ręcznych odcinających również firmy Qualiflow. Stosowano MFC-y regulujące przepływ gazów w zakresach:

- $0 \div 10 \text{ ml/min.}$,
- $0 \div 50 \text{ ml/min.}$,
- $0 \div 100 \text{ ml/min.}$,

- 0 ÷ 500 ml/min.,
- 0 ÷ 1000 ml/min.,
- 0 ÷ 2000 ml/min.,
- 0 ÷ 5000 ml/min.,
- 0 ÷ 15000 ml/min.

Stosowano zawory pneumatyczne normalnie otwarte i normalnie zamknięte, w tym również zawory przełączające bądź dołączające linie gazowe. Ręczne zawory odcinające służą do szybkiego i pewnego otwarcia lub zamknięcia linii gazowych (szczególnie saturatorów ze związkami metaloorganicznymi oraz linii azotowej i wodorowej). Wszystkie te zawory (zarówno pneumatyczne jak i ręczne) zapewniają szczelność helową.

W liniach gazowych dozownika zamontowano niskociśnieniowe zawory zwrotne, które zabezpieczają przed wstecznymi przepływami gazu między liniami.

Szczelność helową instalacji gazowej zapewniają połączenia spawane w plazmie argonowej i skręcane ze złączkami typu VCR. Zawory, MFC-y i PC-y, wcześniej wymienionych firm, wybrano ze względu na jakość wykonania (szczelność i niezawodność), krótki czas zadziałania oraz minimalne objętości "martwe".

W skład dozownika wchodzi również saturatory ze związkami metaloorganicznymi (TMGa, TMIIn, TMAI, DEZn).

4.1.2. Źródła gazów i związków metaloorganicznych.

Gaz postojowy i gaz nośny (tzw. "stand by").

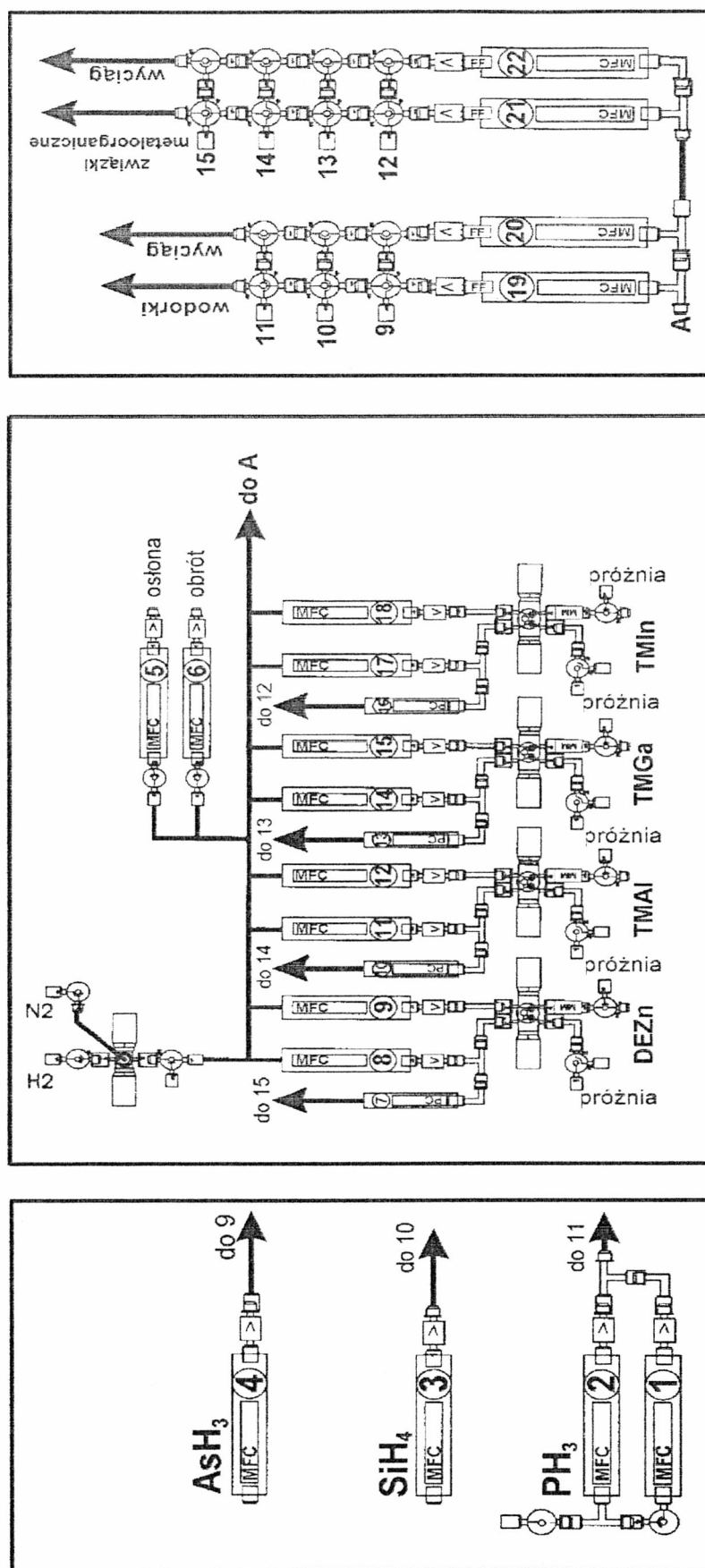
Gazem postojowym jest azot o sumarycznej zawartości tlenu i pary wodnej mniejszej niż 1 ppm, który jest wytwarzany w generatorze azotu firmy Atlas Copco [64]. Czystość taką uzyskuje się dzięki oczyszczaniu przez dwa szeregowo połączone oczyszczalniki zawierające kolumny odtleniające (sorbenty miedziowe) oraz suszące (zeolit 5A). Czystość azotu monitorowana jest za pomocą miernika zawartości tlenu w gazach firmy Servomex oraz miernik zawartości pary wodnej w gazach firmy Shaw [65,66].

Gazem nośnym jest wodór o czystości lepszej niż 6N, który wytwarzany jest w generatorze wodoru firmy Johnson Matthey z palladowo-srebrowym dyfuzorem [67].

Wszystkie gazy doprowadzano do stanowiska rurkami ze stali nierdzewnej wewnątrznie polerowanymi elektrochemicznie.

Gazy reakcyjne.

Podstawowym gazem reakcyjnym była 10% mieszanina arsenowodoru (AsH_3) w wodorze. Używano gazów o czystości Electronic Grade produkcji firm: Alphagaz, Messer [68,69].



Rys. 4.1. Schemat dozownika stanowiska do epitaksji MOVPE.

Źródłem domieszki typu n, przy wytwarzaniu warstw domieszkowanych, był silan (SiH_4), również o czystości Electronic Grade produkcji firmy Alphagaz, rozcieńczony w wodorze do stężenia 100 ppm [68].

Na stanowisku może być używana również mieszanina 10% fosforowodoru (PH_3) w wodorze o czystości Electronic Grade.

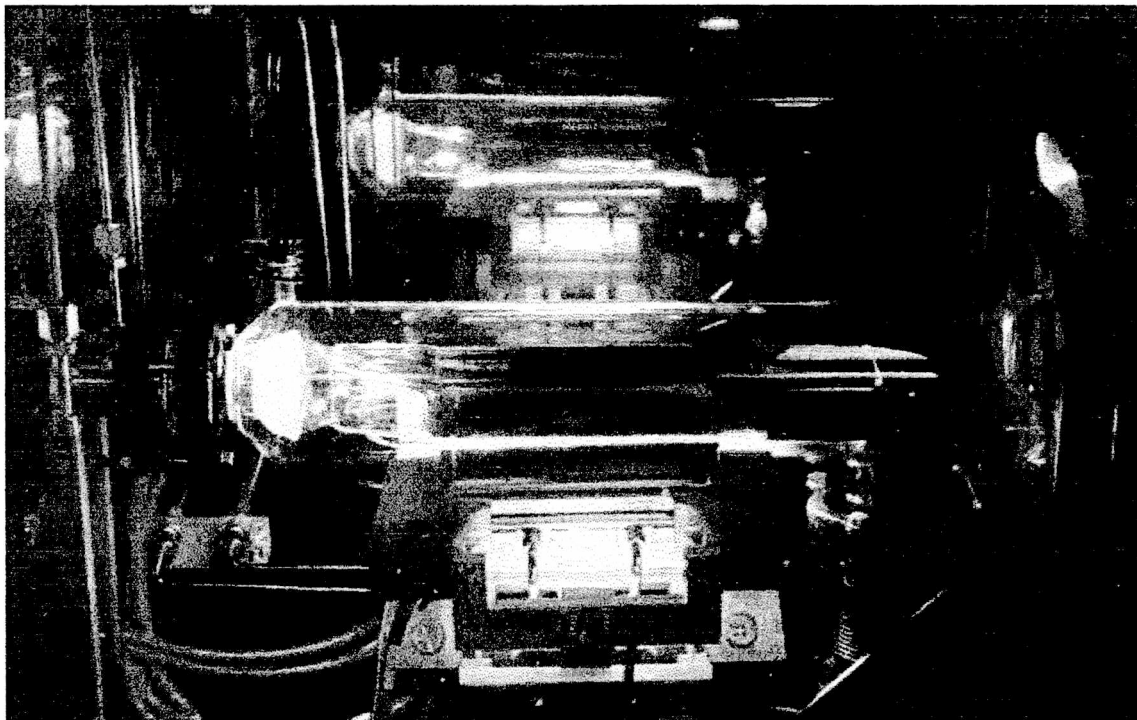
Źródła metaloorganiczne.

Związki metaloorganiczne znajdują się w saturatorach ze stali nierdzewnej, umieszczonych w chłodziarkach z elementami Peltier'a. Urządzenia te gwarantują dokładne dozowanie związków metaloorganicznych dzięki regulacji i stabilizacji temperatury w granicach $\pm 0,1\text{K}$ (prężność par tych związków silnie zależy od temperatury).

Stosowano trimetylgal TMGa oraz trimetylind TMIn o czystości nie gorszej niż 6N (wynik analizy spektralnej), produkcji Instytutu Chemii Organicznej Politechniki Warszawskiej i firmy Morton. Źródłem domieszki typu p, przy wytwarzaniu warstw domieszkowych, był dietylcynk DEZn również o czystości nie gorszej niż 6N produkcji firmy Alphagaz.

4.2. Reaktor epitaksjalny.

Badania przeprowadzono w reaktorze AIX 200 R&D firmy AIXTRON. Jest to reaktor poziomy o przekroju prostokątnym z zewnętrzną gazową osłoną w rurze kwarcowej o przekroju kołowym (rys. 4.2.).



Rys. 4.2. Zdjęcie reaktora do stanowiska epitaksjalnego.

Wprowadzanie gazów reakcyjnych do reaktora następuje niezależnie dwoma wlotami, osobno doprowadzone są związki metaloorganiczne i osobno związki wodorkowe. Wszystkie gazy reakcyjne mieszały się w przedniej części reaktora i już jako ujednorodniona struga docierały do części reakcyjnej, gdzie umieszczone było podłoże. Maksymalny wymiar podłoża dla tego typu reaktora to 2 cale. Podczas procesu epitaksji podłoże może się obracać na dysku grafitowym, którego obrót jest realizowany poprzez nadmuchiwanie wodoru od spodu podłoża. Prędkość obrotowa dysku może być regulowana. Można uzyskać od kilku do kilkudziesięciu obrotów na minutę. Zastosowano radiacyjne grzanie podstawy grafitowej z umieszczonym na nim podłożem. Do sterowania przepływami gazów zastosowano system komputerowy. Do grzania używano pięć lamp halogenowych o mocy 1,2kW każda. Układ grzejny zapewnia pracę w zakresie temperatur od 100 do 840°C z nie-dokładnością $\pm 0,1^\circ\text{C}$.

4.3. System sterowania procesem.

Sterowanie odbywa się za pomocą modułu sterującego, opartego o jedno-układowe mikrokomputery zgodne z Intel 8051, współpracującego z komputerem PC AT486. Możliwe jest zadawanie sekwencji pracy zaworów, przepływów gazów, czasu trwania poszczególnych etapów procesu i ilości etapów. Operator może ingerować w przebieg procesu: np. zmieniać wartość przepływu gazów, stany zaworów, czy czas trwania etapów. Możliwe jest też uzyskanie liniowego narostu lub spadku prędkości przepływu gazów w czasie, istotne w wytwarzaniu struktur z kontrolowanym gradientem składu lub poziomem domieszkowania.

4.4. Wnioski.

Opisane wyżej stanowisko MOVPE przeznaczone jest do epitaksji wybranych związków półprzewodnikowych AIIIIBV. Umożliwia ono osadzanie czystych, tzn. niedomieszkowanych warstw GaAs, (In, Ga) As, (Al, Ga) As i (In, Ga)(As, P) oraz warstw domieszkowanych GaAs i (Al, Ga) As – domieszki: Si (typ n) – koncentracje otrzymywane: $k \cdot 10^{15}$ do $k \cdot 10^{18}\text{cm}^{-3}$ i Zn (typ p) – koncentracje otrzymywane: $k \cdot 10^{17}$ do $k \cdot 10^{19}\text{cm}^{-3}$. Konfiguracja dozownika gwarantuje uzyskanie ostrych granic rozdziału warstw rzędu 60nm/dekadę spadku koncentracji nośników ładunku. Uzyskano jednorodność grubości warstw i koncentracji nośników w warstwie na poziomie $\pm 1\%$.

W podsumowaniu można stwierdzić, że zaprojektowane i wykonane z udziałem autora laboratoryjne stanowisko badawcze MOVPE w pełni spełnia

wymagania technologii niskowymiarowych heterostruktur $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ przeznaczonych do konstrukcji przyrządów optoelektronicznych (diody laserowe, detektory promieniowania), elektronicznych (tranzystory) jak i podłoży aktywnych (układy scalone).

ROZDZIAŁ V

Wytwarzanie epitaksjalnych warstw $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

W niniejszym rozdziale opisano stosowaną przez autora metodę otrzymywania epitaksjalnych heterostruktur $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ na podłożach arsenkowogalowych. Przy wyborze metodyki eksperymentu korzystano zarówno z danych literaturowych jak i własnych doświadczeń zdobytych przy opracowywaniu technologii osadzania arsenku galu na podłożach arsenkowogalowych i krzemowych.

5.1. Wybór podłoży arsenkowogalowych.

Badania kinetyki wzrostu warstw arsenku galowo-indowego osadzanych na podłożach arsenkowogalowych prowadzono stosując podłoża produkcji ITME. Podłoża te miały następujące parametry:

Parametr/podłoże	GaAs Nd	GaAs:Te	GaAs:Si
EPD [$1/\text{cm}^2$]	$4,8 \cdot 10^4$	$< 5 \cdot 10^4$	$300 \div 400$
koncentracja nośników [$1/\text{cm}^3$]	$2,5 \cdot 10^{11}$	$2,1 \cdot 10^{18}$	$1,05 \cdot 10^{18}$
grubość [μm]	375 ± 20	400 ± 20	400 ± 20
rezystancja [Ωcm]	$4,5 \cdot 10^7$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$

5.2. Przygotowanie podłoży arsenkowogalowych.

Procedura przygotowania podłoża arsenkowogalowego do procesu epitaksji podzielona była na trzy etapy:

I standardowa procedura mycia podłoża:

- odłuszczenie – mycie w H_2SO_4 (w 50°C),
- płukanie wodą dejonizowaną i suszenie w strumieniu azotu,
- mycie w TRI w ultradźwiękach (w 50°C),
- płukanie wodą dejonizowaną i suszenie w strumieniu azotu,
- mycie w acetonie w ultradźwiękach (w 50°C),
- płukanie wodą dejonizowaną i suszenie w strumieniu azotu,

- mycie w izopropanolu (w 50° C),
- suszenie w strumieniu azotu,
- trawienie w roztworze $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ (12 : 1 : 1),
- płukanie wodą dejonizowaną i suszenie w strumieniu azotu,
- płukanie w izopropanolu (w 50° C) i suszenie w strumieniu azotu,

II podział podłoża na cztery części:

- dzielenie podłoża na cztery części (każda z części używana była do jednego procesu,
- ważenie podłoża (używano wagi elektronicznej firmy SARTORIUS [70]),

III chemiczne usuwanie tlenków:

- odtlenianie powierzchni podłoża w roztworze $\text{HCl} : \text{izopropanol}$ (1 : 10),
- kilkakrotne płukanie w izopropanolu
- gotowanie w izopropanolu
- suszenie w strumieniu azotu.

Tak przygotowane podłoże umieszczano w reaktorze na podstawie grafitowej. Po zamknięciu reaktora rozpoczynano sterowany komputerowo proces epitaksji heterostruktury. Należy zaznaczyć, że do wytwarzania struktur przyrządowych stosowano całe 2 calowe podłoża. Pozostała procedura przygotowania podłoży wykonywana była zgodnie z opisaną wcześniej. Dzięki temu eliminowano efekty brzegowe, znaczne w przypadku stosowania ćwiartki 2 calowego podłoża .

5.3. Dobór parametrów osadzania warstw $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ na podłożu GaAs.

W celu określenia optymalnych parametrów technologicznych badano wpływ różnych temperatur osadzania i atmosfery gazowej na skład warstwy $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ i szybkość wzrostu. Stałymi parametrami we wszystkich badaniach były:

- $T_w = 840^\circ\text{C}$ – temperatura wygrzewania podłoża arsenkowogalowego w atmosferze wodoru i arsenowodoru przed rozpoczęciem osadzania warstwy arsenku galu,
- $T_{\text{TMGa}} = -10^\circ\text{C}$ – temperatura źródła TMGa,
- $T_{\text{TMin}} = 30^\circ\text{C}$ – temperatura źródła TMin,
- $V_{\text{H}_2\text{VENT}} = 200\text{ml/min.}$ – przepływ wodoru przez linię VENT dozownika,
- $t_w = 10\text{min.}$ – czas wygrzewania podłoża arsenkowogalowego przed osadzeniem pierwszej warstwy,
- $t_{wz} = 5\text{min.}$ – czas osadzania warstwy $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$,
- $t_{\text{buf}} = 30\text{min.}$ – czas osadzania warstwy buforowej GaAs,
- $t_{\text{bar}} = 9\text{min.}$ – czas osadzania warstwy barierowej GaAs,
- $V_{\text{AsH}_3} = 300\text{ml/min.}$ – przepływ arsenowodoru podczas epitaksji,

– $V_{H_2/TMGa} = 7\text{ml/min.}$ – przepływ wodoru przez saturator z TMGa.

Parametry procesu osadzania zmieniano w zakresie:

– $T_{wz} = 650 \div 690^\circ\text{C}$ – temperatury osadzania warstw,

– $V_{H_2RUN} = 9 \div 12\text{l/min.}$ – sumaryczny przepływ wodoru przez reaktor – linia RUN dozownika,

– $V_{H_2/TMIn} = 10 \div 75\text{ml/min.}$ – przepływ wodoru przez saturator z TMIn.

Określono zależność "x" i średniej szybkości ϑ_{wz} od temperatury osadzania, sumarycznego przepływu wodoru przez reaktor i stężenia TMIn w reaktorze.

1) Zależność $x = f(T_{wz})$ – pokazano na rys. 5.1.a.

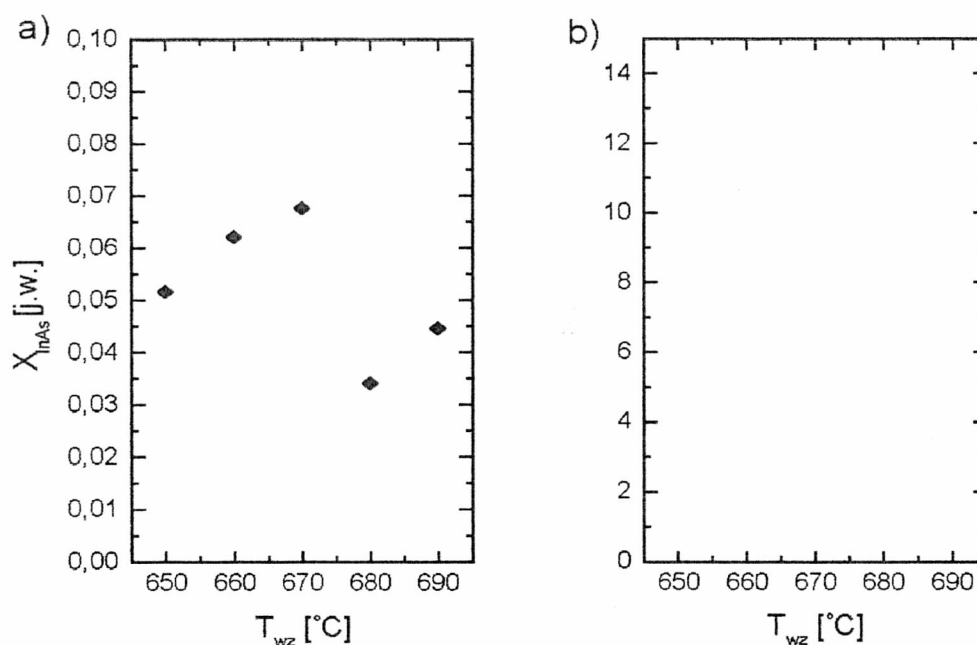
a $\vartheta_{wz} = f(T_{wz})$ – na rys. 5.1.b.

Badania prowadzono przy:

– $T_{wz} = 650 \div 690^\circ\text{C}$,

– $V_{H_2RUN} = 9\text{l/min.}$,

– $V_{H_2/TMIn} = 25\text{ml/min.}$



Rys. 5.1. Zależność składu i szybkości wzrostu stopu potrójnego $In_xGa_{1-x}As$ od temperatury osadzania.

W zakresie temperatur $660 \div 680^\circ\text{C}$ wystąpiły niewielkie zmiany szybkości wzrostu (jest to tzw. okno temperaturowe). Zaś w temperaturze 670°C zaobserwowano maksymalny stopień wbudowywania się InAs w warstwę stopu potrójnego. Na tej podstawie jako optymalną temperaturę epitaksji warstw

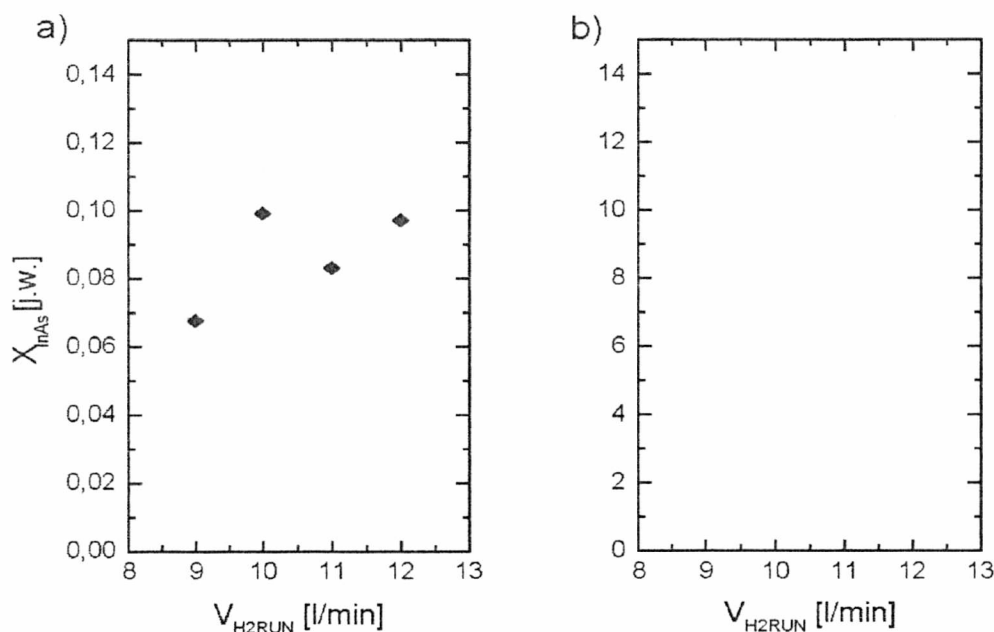
$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ wybrano 670°C . Zmiana temperatury w granicach $\pm 5^\circ\text{C}$ (przy stabilizacji $\pm 0,2^\circ\text{C}$) nie wpływa w znaczący sposób na szybkość wzrostu, a wartość "x" (zawartość InAs w InGaAs) jest maksymalna.

2) Zależność $x = f(V_{\text{H2RUN}})$ – pokazano narys. 5.2.a.

a $\vartheta_{\text{wz}} = f(V_{\text{H2RUN}})$ – na rys. 5.2.b.

Badania prowadzono przy:

- $T_{\text{wz}} = 670^\circ\text{C}$,
- $V_{\text{H2RUN}} = 9 \div 12 \text{ l/min.}$,
- $V_{\text{H2/TMIn}} = 25 \text{ ml/min.}$



Rys. 5.2. Zależność składu i szybkości wzrostu stopu potrójnego $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ od sumarycznego przepływu wodoru przez reaktor.

Zaobserwowano również, że maksymalne wbudowywanie się InAs w warstwę stopu potrójnego występuje przy sumarycznym przepływie wodoru $V_{\text{H2RUN}} = 10 \text{ l/min}$. Przy tym przepływie szybkość wzrostu znajduje się blisko minimum. Gwarantuje to jednorodny w modzie dwuwymiarowym wzrost warstwy. Jest to ważne szczególnie dla struktur niskowymiarowych np. z wielokrotnymi studniami kwantowymi wykorzystywanymi do wytwarzania podłoży aktywnych. Dlatego przepływ 10 l/min wybrano do dalszych prac jako optymalny.

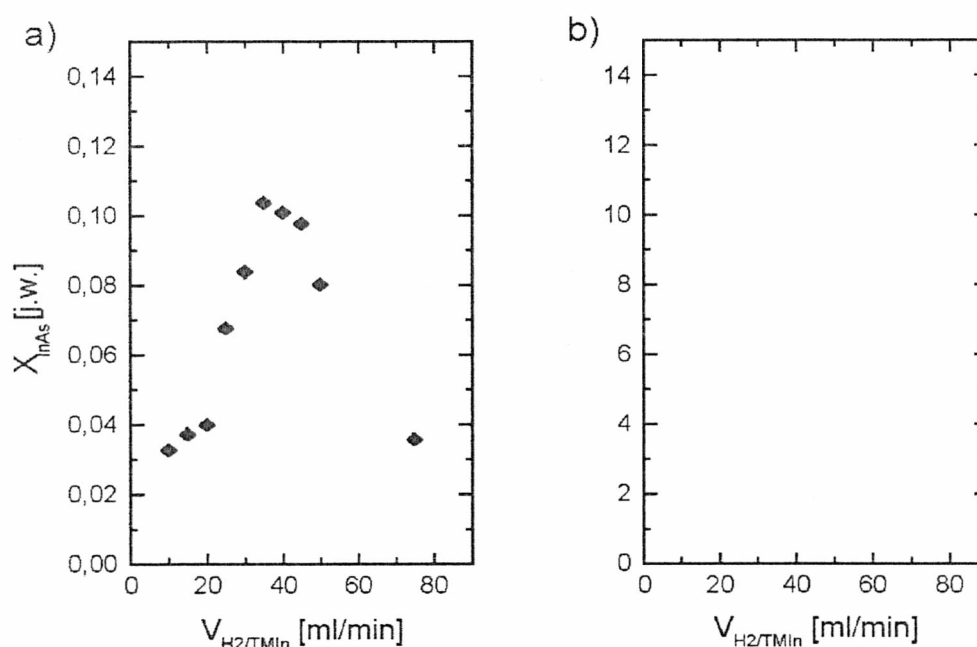
3) Zależność $x = f(V_{\text{H2/TMIn}})$ – pokazano na rys. 5.3.a.

a $\vartheta_{\text{wz}} = f(V_{\text{H2/TMIn}})$ – na rys. 5.3.b.

Badania prowadzono przy:

- $T_{wz} = 670^{\circ}\text{C}$,
- $V_{\text{H}_2\text{RUN}} = 10\text{l/min.}$,
- $V_{\text{H}_2/\text{TMIIn}} = 10 \div 75\text{ml/min.}$

Zaobserwowano niewielkie zmiany szybkości wzrostu warstwy $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ w dużym zakresie wartości przepływu ($V_{\text{H}_2/\text{TMIIn}} = 10 \div 50\text{ml/min.}$). Znaczący wpływ na szybkość wzrostu ma koncentracja TMGa w strefie osadzania. Dlatego podstawowym kryterium wyboru optymalnego przepływu wodoru była zawartość związku InAs w stopie potrójnym. W w/w zakresie zmian przepływu wodoru przez saturator z TMIn zaobserwowano maksimum wbudowywania się



Rys. 5.3. Zależność składu i szybkości wzrostu stopu potrójnego $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ od przepływu wodoru przez saturator z TMIn.

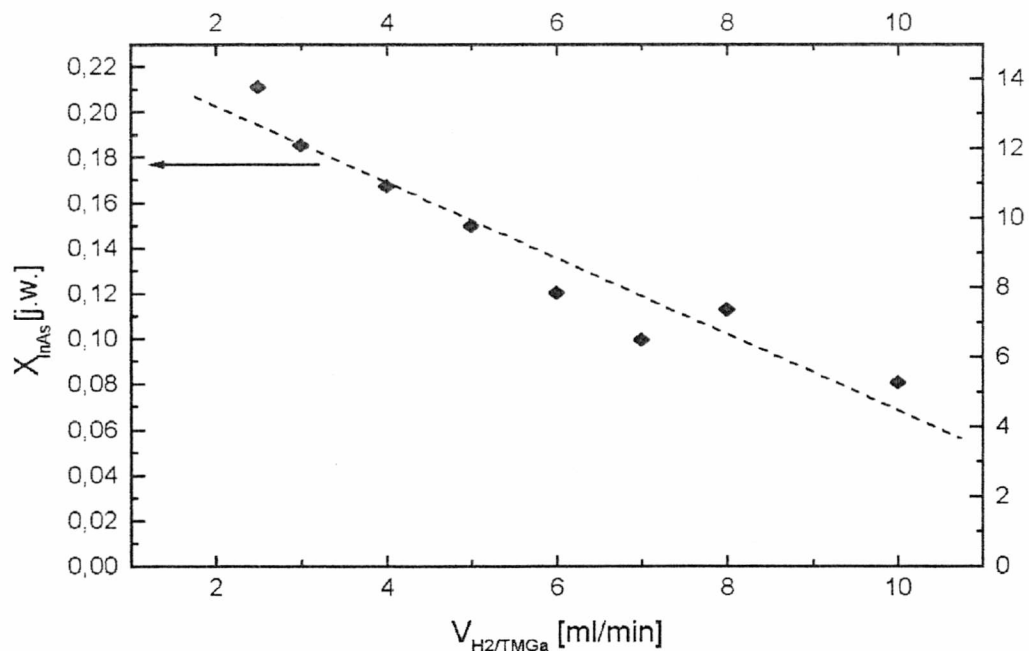
indu dla $V_{\text{H}_2/\text{TMIIn}} = 35\text{ml/min.}$ Dla mniejszych przepływów proces wbudowywania indu zmniejszał się ze względu na mniejsze stężenie TMIn w gazie reakcyjnym. Dla większych przepływów H_2 efektywność wbudowywania indu również malała. Było to spowodowane najprawdopodobniej graniczną szybkością sublimacji TMIn w saturatorze. Na podstawie badań zdecydowano się stosować przepływ wodoru przez saturator z TMIn na poziomie $V_{\text{H}_2/\text{TMIIn}} = 35\text{ml/min.}$, przy stosowanej temperaturze związku TMIn.

5.4. Określenie składu warstwy w zależności od przepływu wodoru przez TMGa.

Badania prowadzono ustalając następujące wartości parametrów procesu:

- $T_{wz} = 670^{\circ}\text{C}$,
- $V_{H_2RUN} = 10\text{l/min.}$,
- $V_{H_2/TMIn} = 35\text{ml/min.}$,
- $V_{H_2/TMGa} = 2,5 \div 10\text{ml/min.}$

Określono szybkość wzrostu warstw $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ oraz zawartość InAs w stopie potrójnym od 8% do 22% dla różnych wartości przepływów wodoru przez saturator z TMGa. Na podstawie tych badań określono szybkość wzrostu warstw dla danego składu (rysunek 5.4.). Dzięki temu można w sposób kontrolowany i powtarzalny osadzać równomierne, pod względem grubości, warstwy o projektowanej grubości poczynając od 3 warstw monowarstw (3ML).



Rys. 5.4. Zależność składu i szybkości wzrostu stopu potrójnego $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ od przepływu wodoru przez saturator z TMGa.

5.5. Wnioski.

Zbadano warunki wzrostu warstw epitaksjalnych arsenku galowo-indowego osadzanego na podłożach arsenkowogalowych. Określono zależności zawartości InAs w stopie potrójnym (x) i średniej szybkości wzrostu (ϑ_{wz}) od: temperatury

osadzania, sumarycznego przepływu wodoru przez reaktor i przepływu wodoru przez saturator z TMIn. Określono warunki kontrolowanego wzrostu warstw $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ przeznaczonych do wytwarzania podłoży aktywnych i przyrządów optoelektronicznych.

ROZDZIAŁ VI

Charakteryzacja heterostruktur $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$.

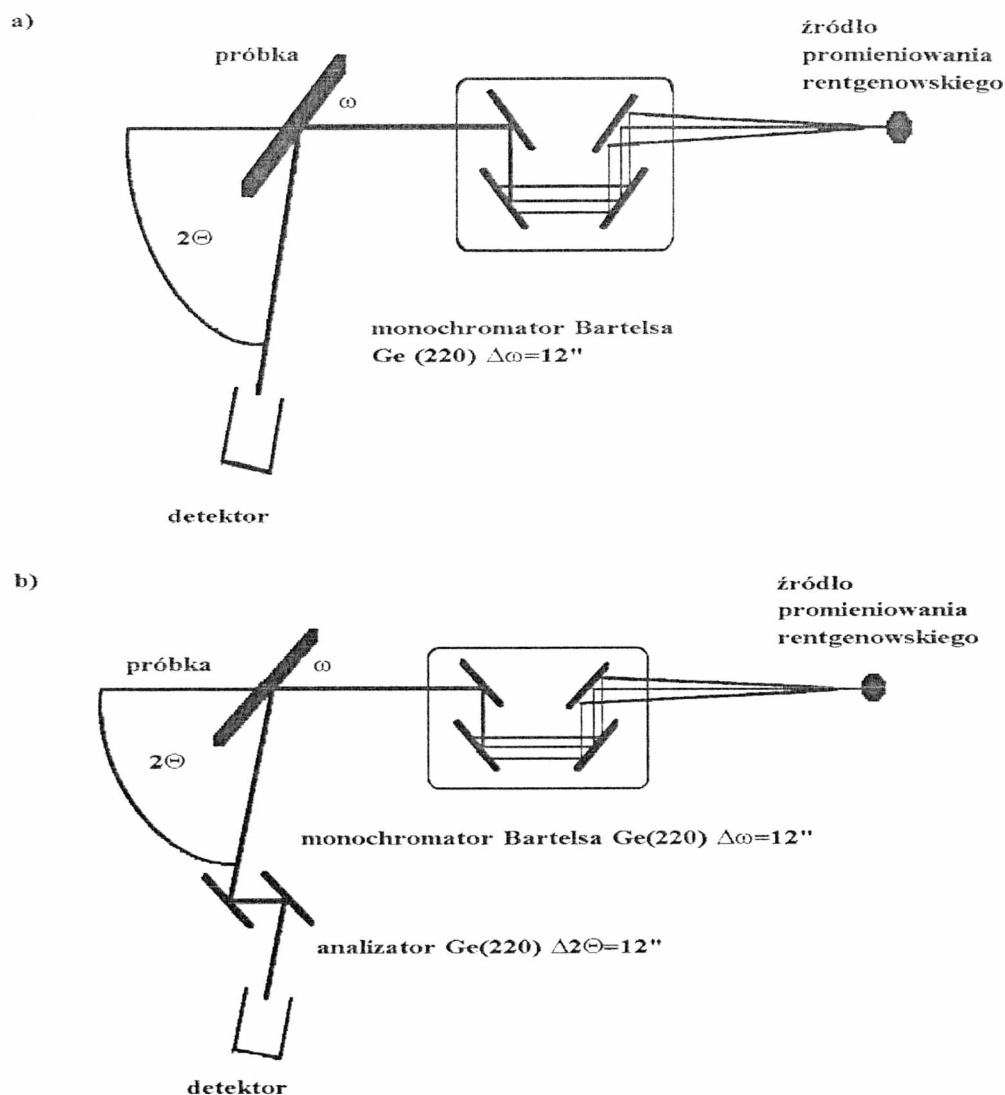
Określenie przedziału optymalnych parametrów technologicznych procesu osadzania heterostruktur $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$, przeznaczonych do konstrukcji przyrządów optoelektronicznych, jest możliwe dzięki wyznaczeniu korelacji między tymi parametrami a właściwościami osadzanych warstw i heterostruktur epitaksjalnych. W niniejszym rozdziale omówiono wyniki badań uzyskane metodami: dyfraktometrii rentgenowskiej wysokiej rozdzielczości (firmy Philips typ MRD–HRD), spektroskopii fotoodbiciowej, fotoluminescencji, elektrochemicznej sondy pojemnościowo– napięciowej (POLARON PN4300 z przystawką do pomiarów spektroskopii fotowoltaicznej firmy Bio–Rad).

6.1. Właściwości strukturalne warstw i studni kwantowych $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$.

Równolegle z pracami doświadczalnymi prowadzono badania mające na celu określenie właściwości strukturalnych otrzymanych heterostruktur $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$. Badania te dostarczały informacji na temat jakości otrzymanych struktur i umożliwiały określenie korelacji między zmianą parametrów technologicznych a parametrami strukturalnymi warstw.

6.1.1. Układ pomiarowy i wyniki pomiarów.

Badania struktury wykonywano za pomocą dyfraktometru rentgenowskiego wysokiej rozdzielczości (High Resolution – Material Research Diffractometer f–my Philips). Zastosowano dwie konfiguracje pomiarowe, które przedstawiono na rys.6.1. W obu przypadkach w torze wiązki pierwotnej wykorzystano monochromator Bartelsa z czterema kryształami germanu ustawionymi na refleks (440). Dzięki temu uzyskano wiązkę pierwotną o małej rozbieżności ($\Delta\omega=5$ arc sec). Pierwszy z układów zastosowano do pomiaru krzywych odbić (rys.6.1.a.), natomiast drugi do pomiaru mapy sieci odwrotnej kryształu (rys.6.1.b.), gdzie w torze wiązki dyfrakcyjnej stosowano analizator ze szczeliną ($\Delta 2\Theta=12$ arc sec). Rezultat pomiaru parametrów przykładowej warstwy epitaksjalnej $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ na podłożu arsenkowogalowym pokazano na rys. 6.2.



Rys. 6.1. Optyka układów pomiarowych dyfrakcji wysokiej rozdzielczości:

a) układ do pomiaru krzywych odbić,

b) układ do mapowania dwuwymiarowej przestrzeni sieci odwrotnej.

6.1.2. Pomiary krzywych odbić warstw $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

Na rys.6.3. pokazano krzywe odbić trzech heterostruktur z różną zawartością indu (od 1,2 do 5%). W zależności od zawartości In refleks od warstwy zmienia położenie na krzywej odbić. Dla większych zawartości InAs refleks jest przesunięty w kierunku większych kątów.

Oprócz refleksów pochodzących od warstw GaAs i $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ na krzywych odbić obserwowano tzw. prążki Pendellösung pochodzące od warstwy $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (rys.6.4.a.). Z odległości między poszczególnymi prążkami można wyznaczyć grubość warstwy ze wzoru:

$$\tau = \lambda g \Gamma / \Delta \omega \sin 2\Theta \quad (6)$$

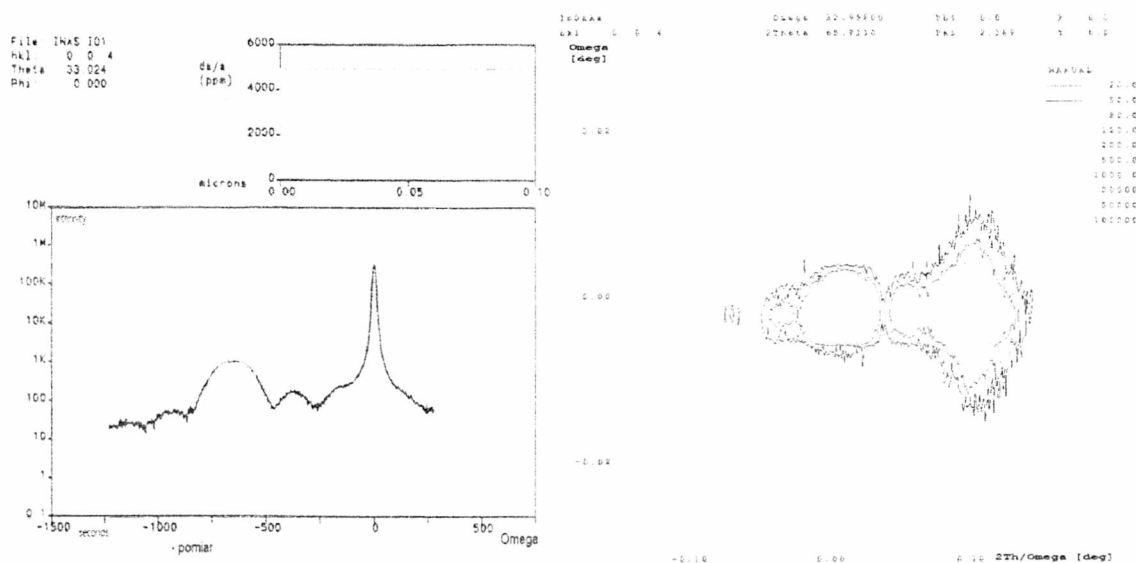
gdzie: λ – długość fali,

$g\Gamma = \sin(\Theta + \alpha)$,

α – kąt pomiędzy płaszczyzną odbijającą, a płaszczyzną powierzchni,

$\Delta\omega$ – odstęp między prążkami,

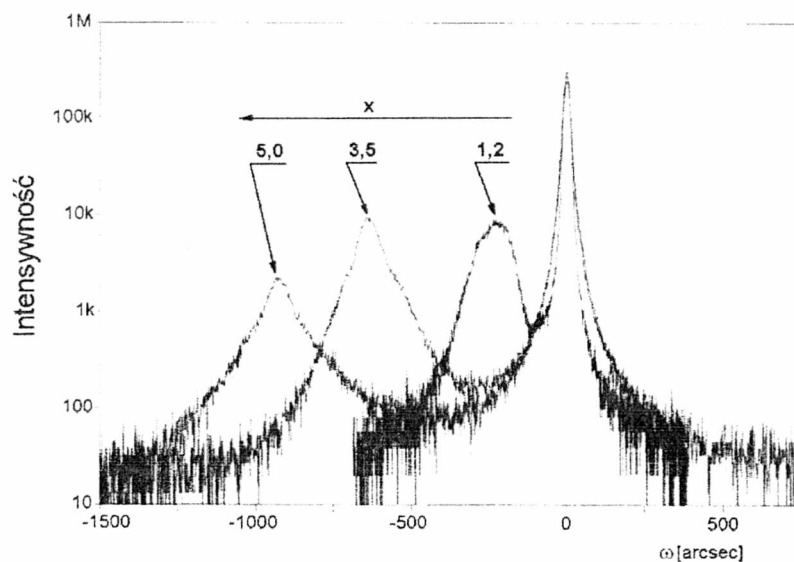
Θ – kąt Bragga.



Rys. 6.2. Rezultat pomiaru parametrów warstwy epitaksjalnej:

a) krzywa odbić otrzymana dla refleksu (004),

b) mapa sieci odwrotnej refleksu (004).

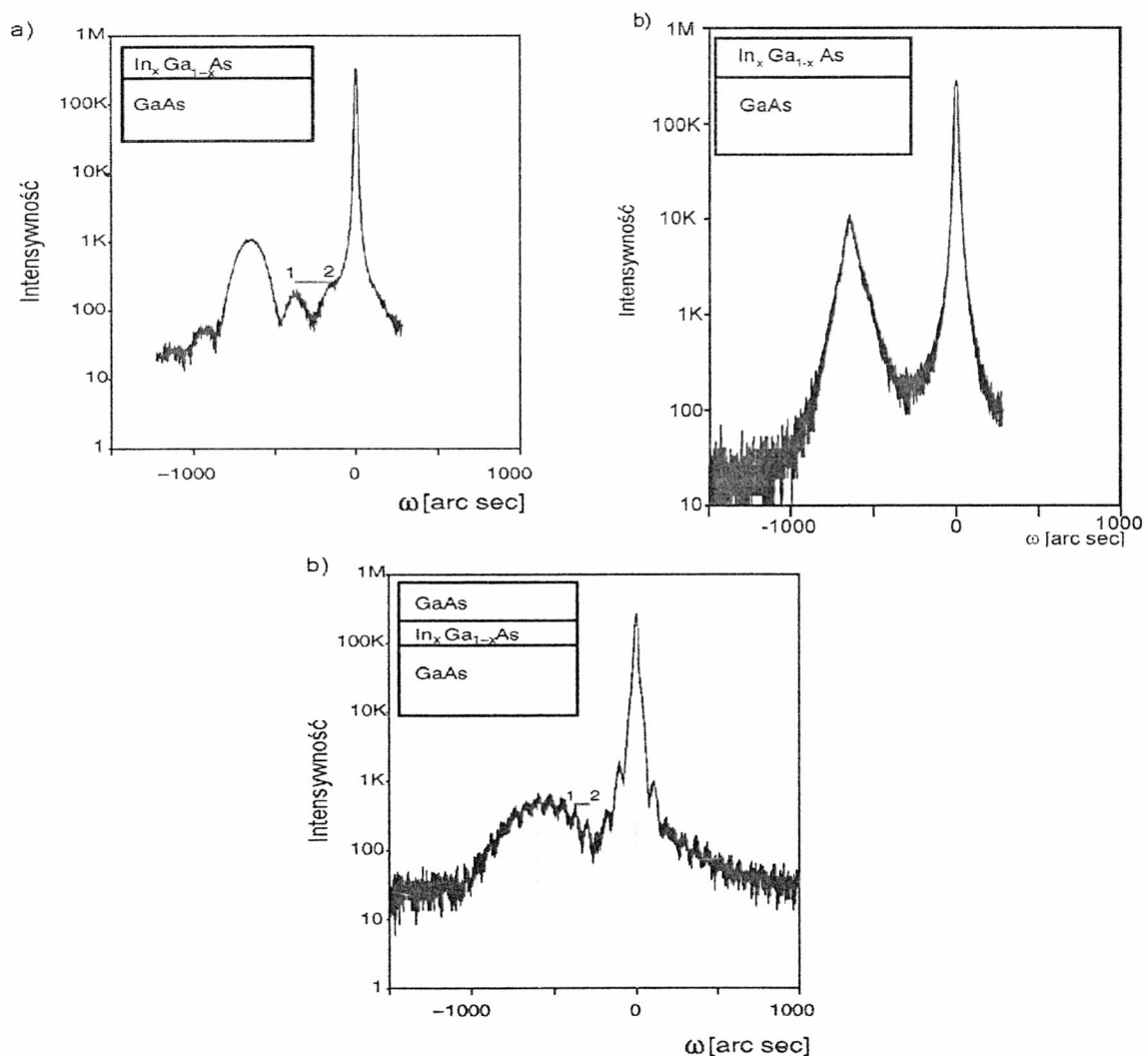


Rys. 6.3. Krzywe odbić heterostruktur z różną zawartością InAs w stopie potrójnym.

W przypadku struktur ze studniami kwantowymi $\text{GaAs}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ odległości między prążkami są podstawą do obliczenia grubości zarówno dwuwarstwy bariera –

studnia jak i grubości pojedynczych warstw – bariery i studni (rys.6.4.c.).

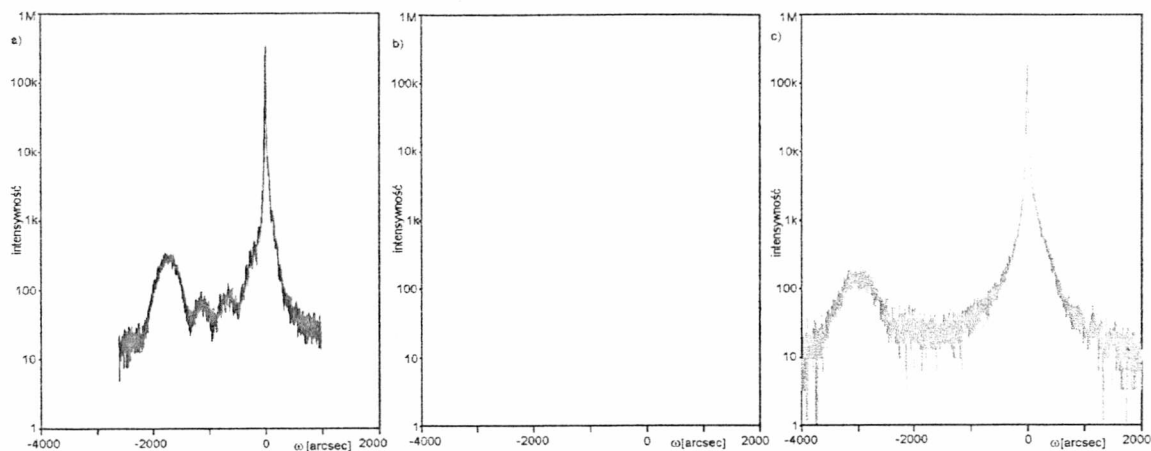
Metodę tę można stosować tylko dla warstw cienkich w pełni naprzężonych. W warstwach grubszych, w których występuje relaksacja naprężeń i heterostruktur z nierównomierną (chropowatą) warstwą przejściową, prążki Pendellösung nie występują (związane to jest z generacją defektów w warstwie przejściowej między GaAs a $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$). Dlatego też obecność tych prążków jest równocześnie dodatkową informacją o jakości międzywarstwy. Na rys.6.4. pokazano przykładowe krzywe odbić dwóch warstw $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ i studni kwantowej, o różnych grubościach i jednakowej zawartości InAs w stopie potrójnym $x=0,037$. Na krzywej odbić warstwy częściowo zrelaksowanej (rys.6.4.b.) nie obserwowano prążków Pendellösung.



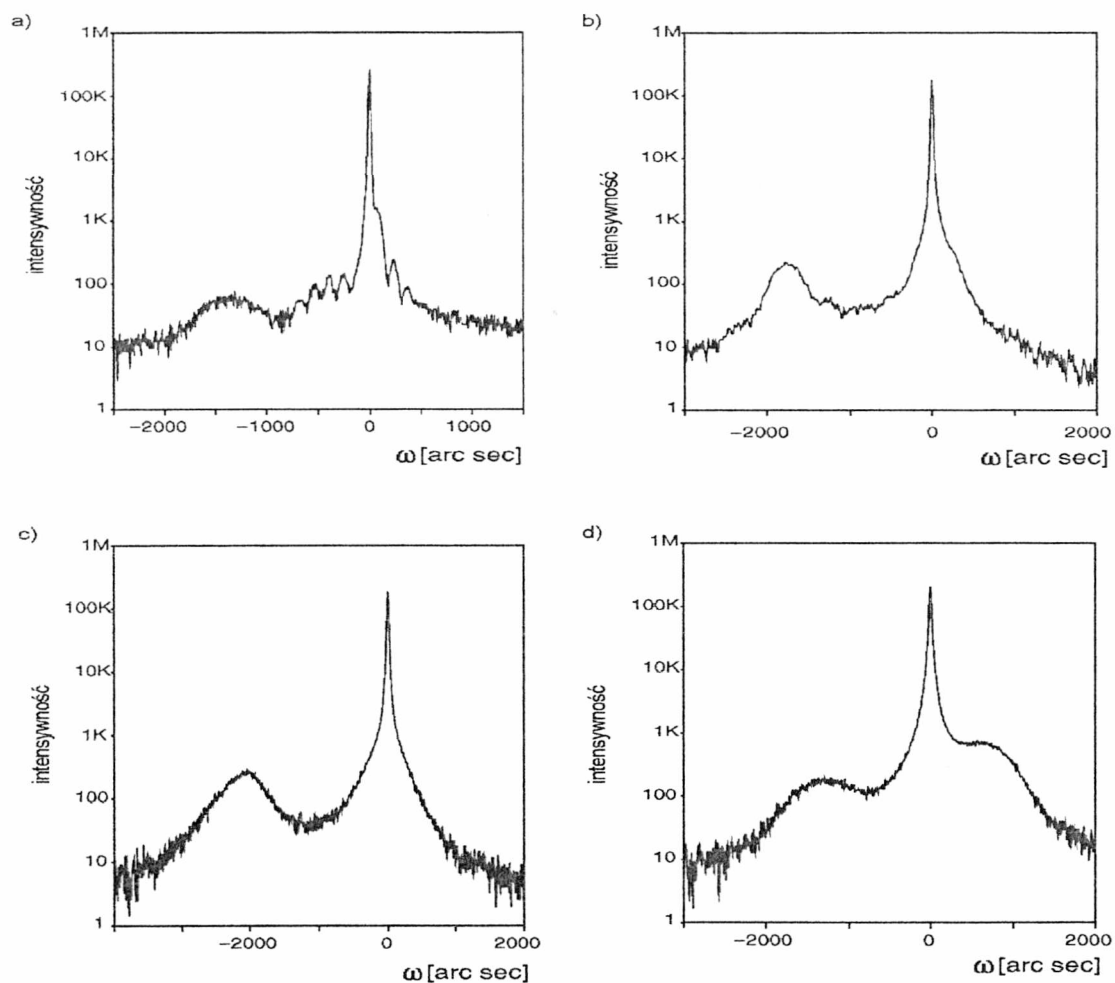
Rys. 6.4. Przykładowe krzywe odbić dla heterostruktur o zawartości InAs w stopie 3,7%
a) warstwy naprężonej, b) warstwy częściowo zrelaksowanej, c) studni kwantowej.

Natomiast krzywe odbić trzech heterostruktur ze studnią kwantową o różnych grubościach (od 30 do 100nm) i jednakowej zawartości InAs w stopie ($x=0,14$),

pokazano na rys.6.5. Widoczne są różnice w krzywych odbić zależące od grubości warstwy studni. Na krzywych odbić warstw o grubości mniejszej od grubości



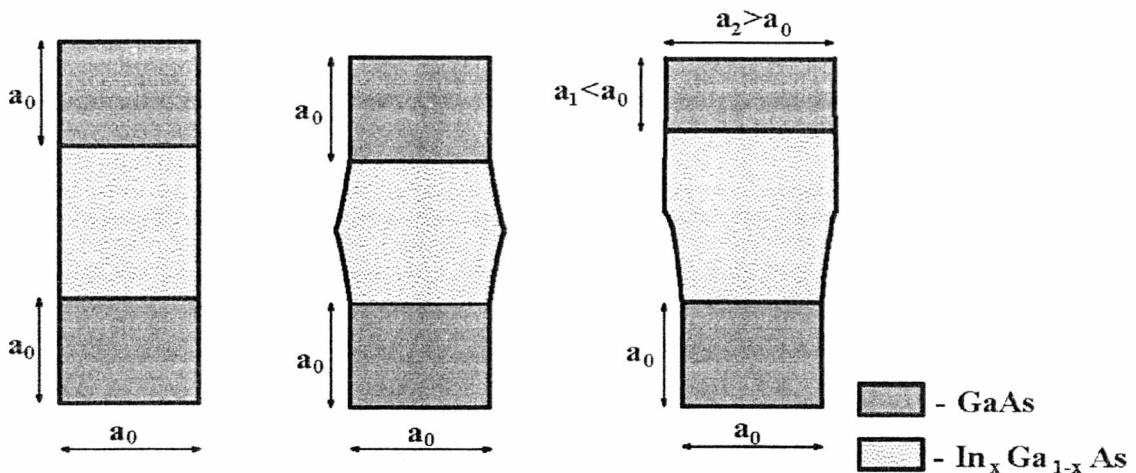
Rys. 6.5. Krzywe odbić struktur studni kwantowych o zawartości InAs w stopie $x=0,14$ i różnych grubościach (od 30nm do 100nm).



Rys. 6.6. Krzywe odbić studni kwantowych o zawartości InAs w stopie 8 % i różnych grubościach (od 50nm do 300nm).

krytycznej widoczne są zarówno refleksy od warstw GaAs i $\text{In}_{0,14}\text{Ga}_{0,86}\text{As}$ jak i prążki Pendellösung od dwuwarstwy $\text{GaAs}/\text{In}_{0,14}\text{Ga}_{0,86}\text{As}$ i prążki Pendellosung pochodzące od warstwy $\text{In}_{0,14}\text{Ga}_{0,86}\text{As}$.

Na krzywej odbić dla heterostruktury o grubości studni porównywalnej z grubością krytyczną (dla $x=0,14$), prążki Pendellösung częściowo zanikają, co oznacza początek generacji dyslokacji niedopasowania w warstwie przejściowej $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$. W przypadku studni kwantowej o grubości większej od grubości krytycznej widoczne są tylko refleksy od warstw GaAs i $\text{In}_{0,14}\text{Ga}_{0,86}\text{As}$. Prążki Pendellosung zanikły na skutek generacji bardzo dużej ilości defektów w warstwie przejściowej między GaAs i $\text{In}_{0,14}\text{Ga}_{0,86}\text{As}$. Na rys.6.6. pokazano krzywe odbić czterech studni kwantowych o różnych grubościach od najcieńszej (50nm) do najgrubszej (300nm). Krzywe na rys.6.6. a, b, c odpowiadają krzywom odbić tych warstw. Większą różnicę obserwowano przy studni najgrubszej (rys.6.6.d), gdzie występuje znaczne poszerzenie refleksu od warstwy GaAs z prawej strony. Związane jest to z relaksacją warstwy barierowej osadzonej bezpośrednio na warstwie studni, co pociąga za sobą zmianę parametru sieciowego bariery GaAs, który dopasowuje się do parametru sieciowego zrelaksowanej studni kwantowej InGaAs rys.6.7.

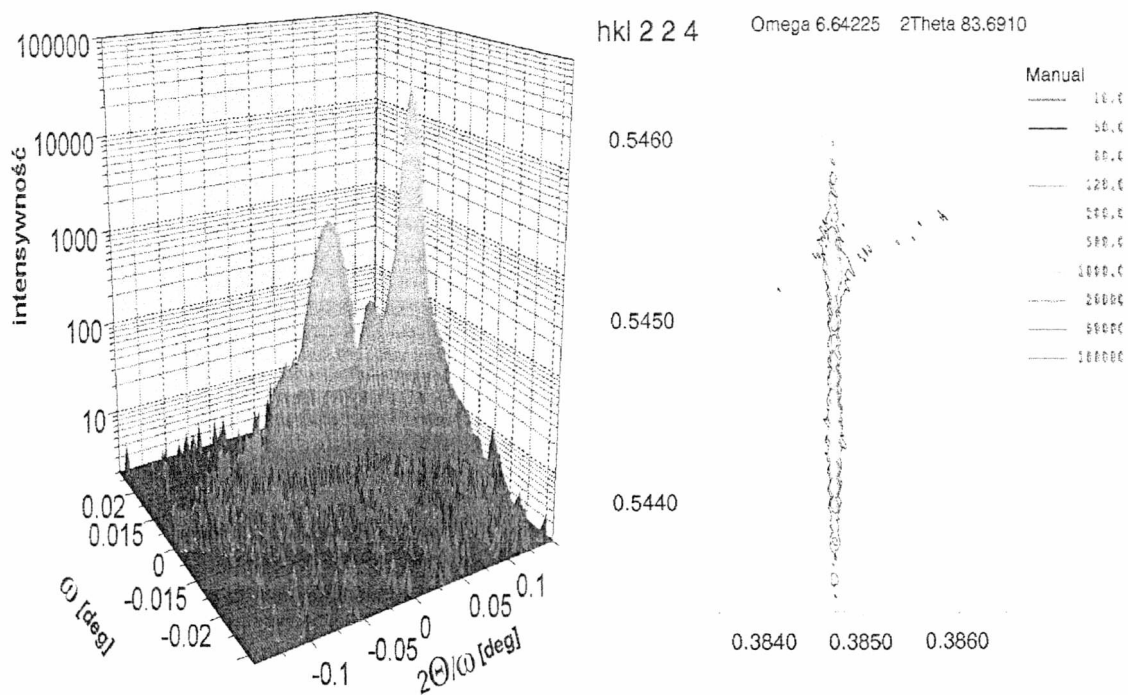


Rys. 6.7. Deformacja sieci krystalicznej warstwy barierowej GaAs osadzonej na grubej warstwie $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$.

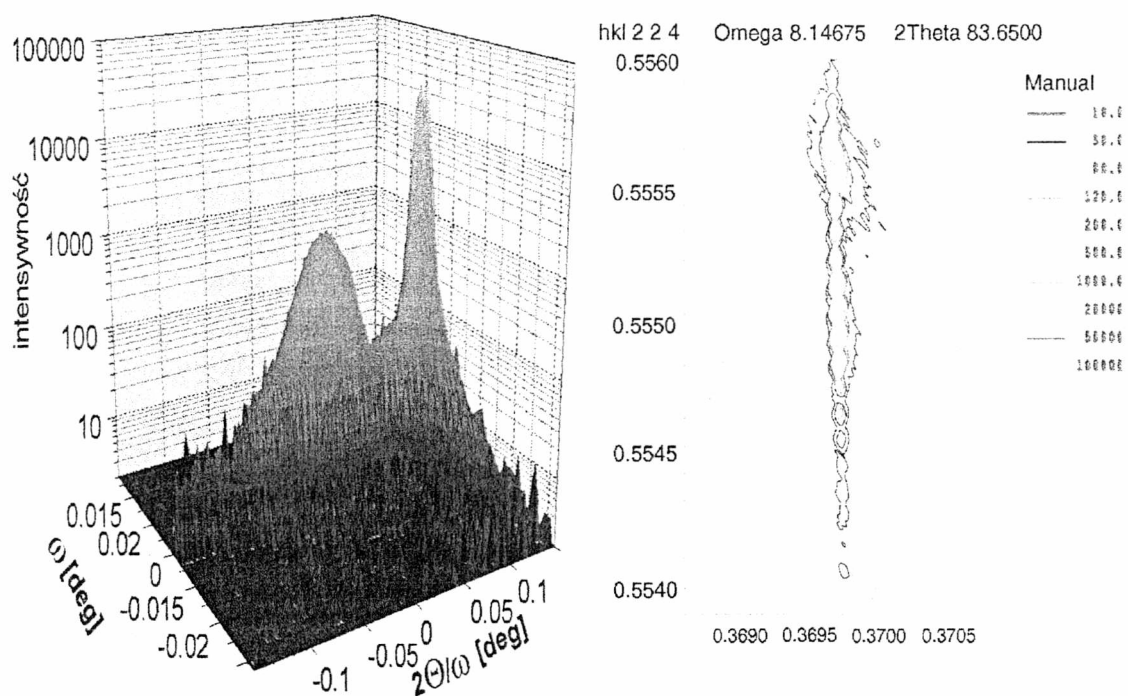
6.1.3. Pomiary map sieci odwrotnych heterostruktur $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$.

Wykonano także pomiary map sieci odwrotnej heterostruktur $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ z różnymi grubościami warstwy $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (rysunki 6.8.1. i 6.8.2.).

a)



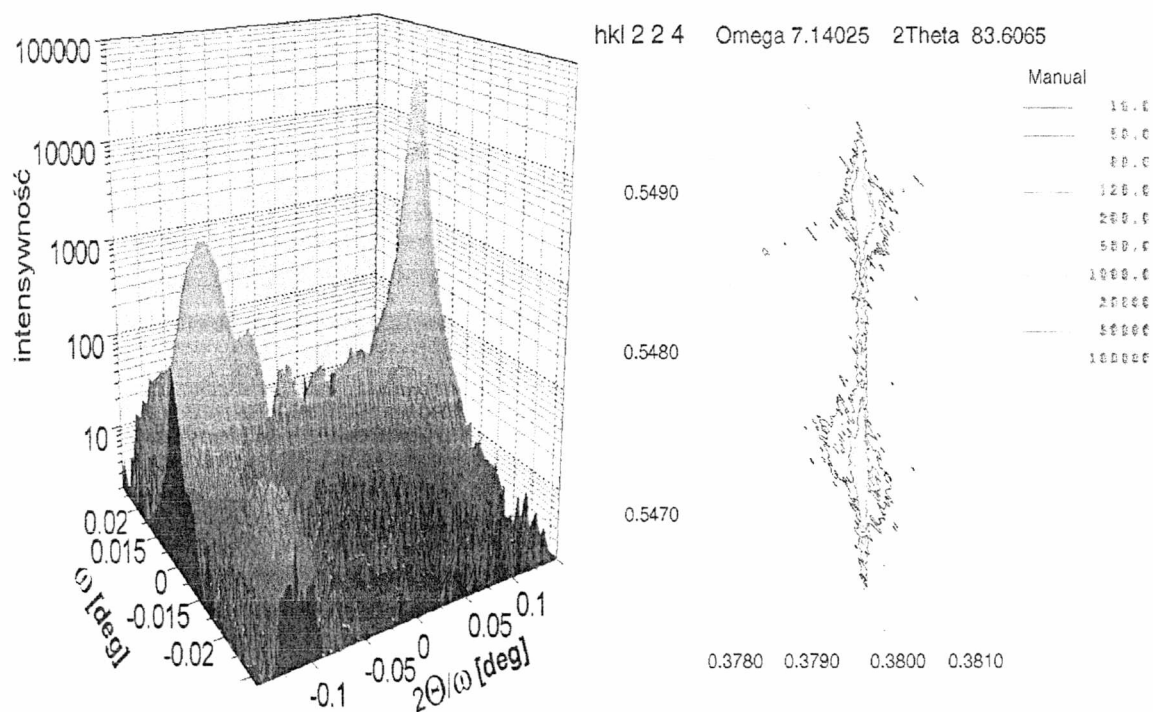
b)



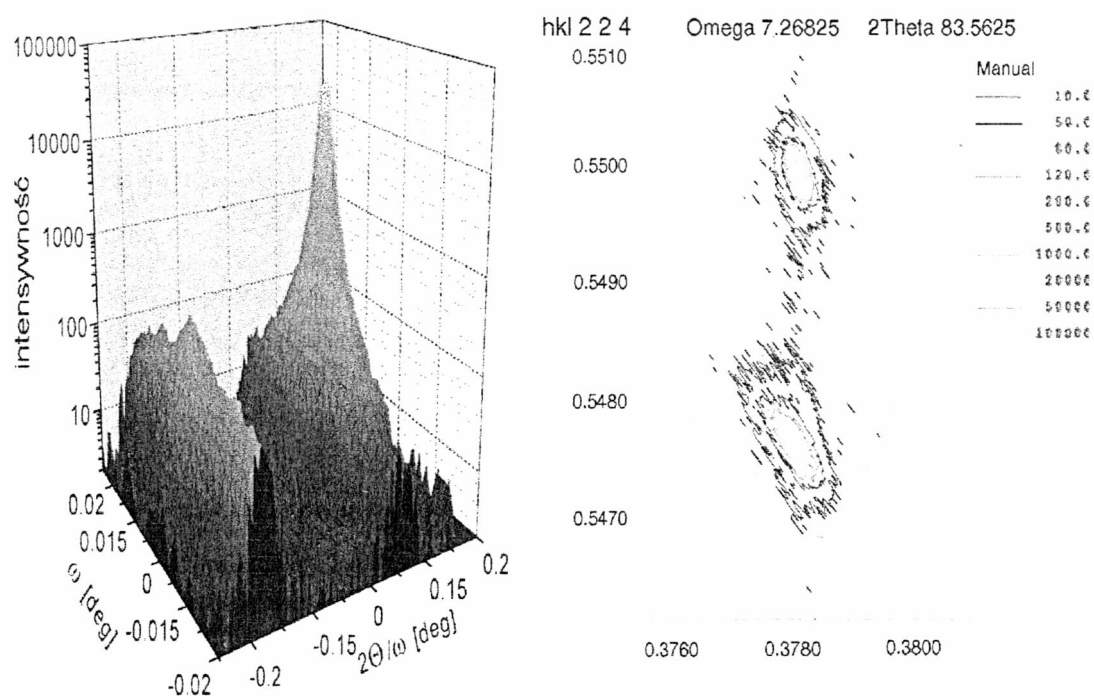
Rys. 6.8.1. Trójwymiarowe mapy sieci odwrotnej kryształu refleksu symetrycznego 004 i dwuwymiarowe mapy sieci odwrotnej kryształu refleksu asymetrycznego 224:

- a) warstwy epitaksjalnej o grubości 340nm i zawartości indu 1,2%,
 b) warstwy epitaksjalnej o grubości 370nm i zawartości indu 1,2%.

a)



b)



Rys. 6.8.2. Trójwymiarowe mapy sieci odwrotnej kryształu refleksu symetrycznego 004 i dwuwymiarowe mapy sieci odwrotnej kryształu refleksu asymetrycznego 224:

- a) warstwy epitaksjalnej o grubości 285nm i zawartości indu 2,1%,
- b) warstwy epitaksjalnej o grubości 410nm i zawartości indu 3,5%.

Pomiar ten daje informację na temat stopnia relaksacji naprężeń w warstwie epitaksjalnej studni oraz stopnia niedopasowania komórki elementarnej $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ w stosunku do GaAs.

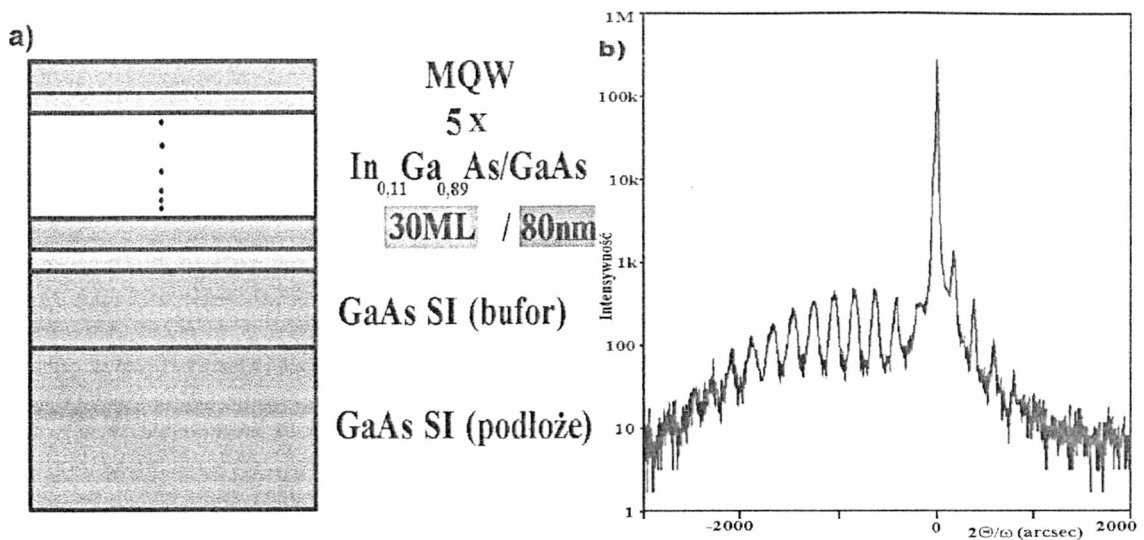
W procesie wzrostu warstwy $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, po przekroczeniu grubości krytycznej, następuje generacja dyslokacji niedopasowania. Na rys.6.8.1.a pokazano trójwymiarową mapę sieci odwrotnej refleksu symetrycznego 004 i dwuwymiarową mapę sieci odwrotnej refleksu asymetrycznego 224 warstwy $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ w pełni naprężonej. Wzdłuż osi $2\Theta/\omega$ refleksy mają charakter krzywej dyfrakcyjnej, a poszerzenie wzdłuż osi ω jest minimalne. Na rys.6.8.1.b pokazano wyniki pomiarów warstwy grubszej, dla której wzdłuż osi ω następuje poszerzenie refleksu GaAs. Związane jest to z pojawieniem się defektów niedopasowania w warstwie przejściowej od strony podłoża. Rys.6.8.2.a pokazuje mapy sieci odwrotnej warstwy częściowo zrelaksowanej.

Widoczne są jeszcze prążki Pendellösung ale poszerzenie wzdłuż osi ω występuje już nie tylko dla refleksu od warstwy GaAs ale również dla refleksu od warstwy $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Mapy sieci odwrotnej kryształu warstwy całkowicie zrelaksowanej pokazano na rys.6.8.2.b. Refleksy od warstwy $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ i podłoża GaAs są całkowicie rozdzielone i prążki Pendellösung są niewidoczne, a poszerzenie na osi ω jest bardzo duże. Świadczy to o bardzo dużej ilości dyslokacji niedopasowania w warstwie przejściowej zarówno od strony podłoża jak i warstwy $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ [71].

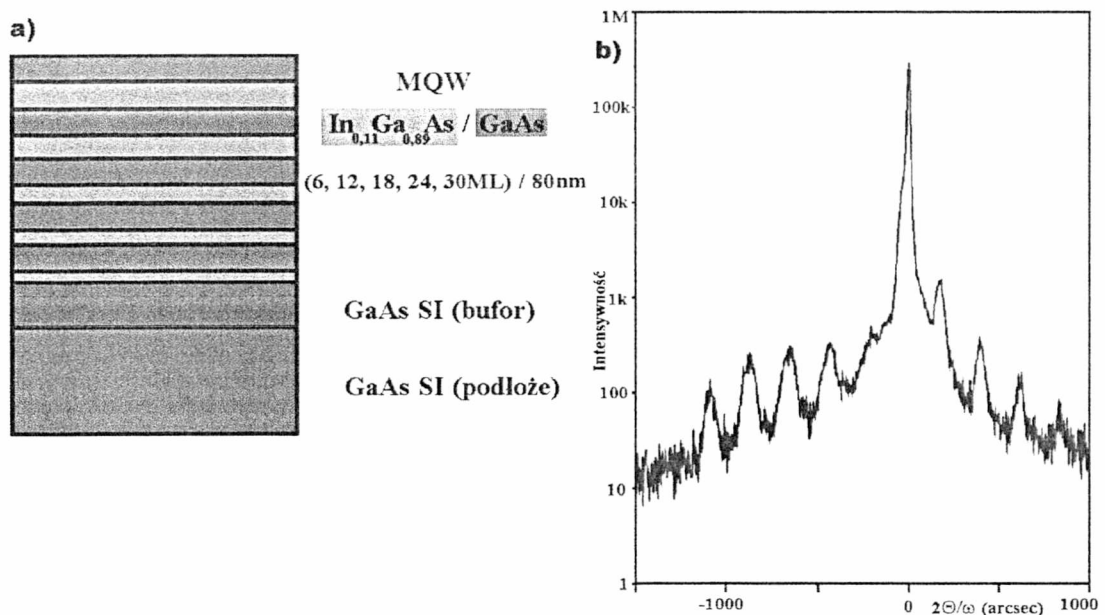
Na podstawie badań rentgenowskich możliwe było dokładne określenie parametrów krystalograficznych heterostruktur $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ takich jak: skład warstwy $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ i jej grubość, doskonałość krystalograficzna warstw, naprężenie w strukturze. Pomiar krzywych odbić pozwalają na szybką ocenę przydatności struktur do zastosowania w przyrządach optoelektronicznych i podłożach aktywnych. Pozwoliły na określenie korekcji i ocenę parametrów technologicznych otrzymanych warstw i studni kwantowych. Wyniki badań były podstawą projektowania i realizowania struktur z wielokrotnymi studniami kwantowymi. Opanowanie technologii MQW pozwala na projektowanie i wykonanie struktur mających zastosowanie jako podłoża aktywne do konstrukcji optoelektronicznych układów scalonych.

6.1.4. Pomiary krzywych dyfrakcyjnych MQW.

W celu potwierdzenia otrzymanych zależności między właściwościami strukturalnymi a konfiguracją struktury (grubość i skład) badano rentgenograficznie zaprojektowane układy z wielokrotnymi studniami kwantowymi, z różnymi grubościami warstw studni i barier. Na rys.6.9. pokazano projekt

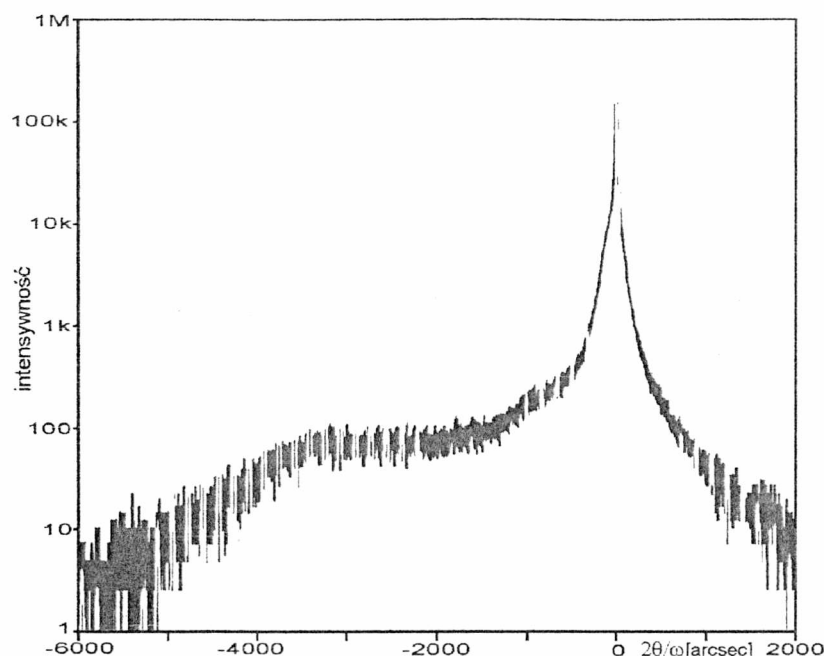


Rys. 6.9. Projekt a) i krzywa dyfrakcyjna heterostruktury b) z pięcioma identycznymi studniami In_{0.1}Ga_{0.9}As (grubość 30 ML każda) i sześcioma barierami GaAs (grubość 80 nm każda).



Rys. 6.10. Projekt a) i krzywa dyfrakcyjna heterostruktury b) z pięcioma studniami kwantowymi o różnych grubościach (6, 12, 18, 24, 30 ML) i jednakowych barierach (80 nm każda).

heterostruktury i krzywą dyfrakcyjną potwierdzającą dobrą powtarzalność parametrów krystalograficznych poszczególnych warstw studni i barier oraz bardzo dobrą jednorodność grubości. Krzywą dyfrakcyjną wielokrotnej studni kwantowej z pięcioma studniami kwantowymi o różnych grubościach (6, 12, 18, 24, 30 ML) i jednakowych barierach pokazano na rys. 6.10. Na rys. 6.11. pokazano krzywą dyfrakcyjną i krzywą symulacyjną heterostruktury z pięcioma studniami kwantowymi i barierami ale o bardzo zdefektowanych granicach rozdziału między



Rys. 6.11. Krzywa dyfrakcyjna wielokrotnej studni kwantowej o bardzo zdefektowanych granicach między warstwami.

warstwami. Na krzywej dyfrakcyjnej widoczne są refleksy pochodzące od GaAs i $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$, ale nie obserwowano prążków satelitarnych świadczących o doskonałej strukturze krystalicznej. Określając powyższe zależności, pomiar rentgenowski takiej struktury pozwala bardzo szybko stwierdzić przydatność wykonanej heterostruktury podłoża aktywnego, przed przystąpieniem do dalszych etapów technologicznych związanych z realizacją przyrządów i układów scalonych.

6.2. Właściwości optyczne warstw i studni kwantowych $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$

W celu pełnego scharakteryzowania otrzymanych heterostruktur prowadzono badania mające na celu określenie ich właściwości optycznych. Otrzymane wyniki pozwoliły wyjaśnić wpływ zmian parametrów technologicznych na właściwości energetyczne otrzymanych studni kwantowych.

6.2.1. Teoria.

Metody modulacyjne w spektroskopii półprzewodników znane są od wielu lat [72]. Rozwój technologii otrzymywania skomplikowanych struktur półprzewodnikowych spowodował renesans badań modulacyjnych heterostruktur o obniżonym wymiarze.

Ogólną zasadą spektroskopii modulacyjnej jest to, że zamiast mierzyć wartość parametru określającego odpowiedź optyczną badanego układu, można wyznaczać

zmiany tej wielkości wywołane modyfikacją warunków pomiarowych. Warunki pomiarowe można modyfikować poprzez okresowe zmiany przyłożonego z zewnątrz czynnika (temperatura, naprężenie, pole elektryczne). Zmiany parametru zewnętrznego wpływają na badany układ, zmieniając jego właściwości dielektryczne.

Obserwowane w spektroskopii modulacyjnej zmiany współczynnika absorpcji czy odbicia są więc wynikiem zmiany zespolonej funkcji dielektrycznej. Zmiany te możemy powiązać z pochodną widma absorpcji $\alpha(\hbar\omega)$ czy widma odbicia $R(\hbar\omega)$ po okresowo zmiennym parametrze. Różniczkowy charakter widm otrzymywanych w spektroskopii modulacyjnej wyostrza obraz przejść optycznych i eliminuje efekty związane ze zbędnym tłem w widmie optycznym badanej próbki. Z pomiarów w temperaturze pokojowej można dokładnie wyznaczyć energie przejść optycznych.

W technice elektromodulacji okresowo zmiennym parametrem, który wywołuje zmiany funkcji dielektrycznej, jest pole elektryczne. W spektroskopii fotoodbiciowej zmiany tej funkcji wywołuje się poprzez modulację pola elektrycznego wbudowanego w strukturę (przypowierzchniową lub przyłączową) przez zastosowanie dodatkowego źródła światła monochromatycznego tzw. "wiązki pompującej" o odpowiednio dobranej energii. Energia fotonów wiązki pompującej jest zazwyczaj wyższa od energii podstawowej przerwy energetycznej badanego półprzewodnika. Typowym źródłem pompującym jest zwykle laser He-Ne o mocy kilku mW lub laser Ar+, którego wiązkę przepuszcza się dodatkowo przez filtr w celu obniżenia mocy do poziomu odpowiedniego dla warunków pomiarów.

W celu eliminacji sygnału tła, w którego skład wchodzi fotoluminescencja z próbki i/lub światło rozproszone z lasera, stosuje się drugi detektor, na który nie pada sygnał użyteczny tylko światło tła luminescencyjnego (plus ewentualnie światło rozproszone). Poprzez elektroniczne wzmocnienie sygnału z drugiego detektora i następnie odjęcie sygnału z obu detektorów można wyeliminować sygnały tła, szumu i sygnały pochodzące od zakłóceń.

Względne zmiany współczynnika odbicia można w prosty sposób powiązać ze zmianami w funkcji dielektrycznej ($\epsilon = \epsilon_1 + i\epsilon_2$) zależnością:

$$\Delta R/R = \alpha(\epsilon_1, \epsilon_2) \Delta \epsilon_1 + \beta(\epsilon_1, \epsilon_2) \Delta \epsilon_2 \quad (7)$$

gdzie:

α i β – współczynniki Seraphina, w ogólności zależące od niezaburzonej funkcji dielektrycznej,

$\Delta \epsilon_1$ i $\Delta \epsilon_2$ – zmiany odpowiednio części rzeczywistej i urojonej funkcji dielektrycznej wywołane przez zaburzenie.

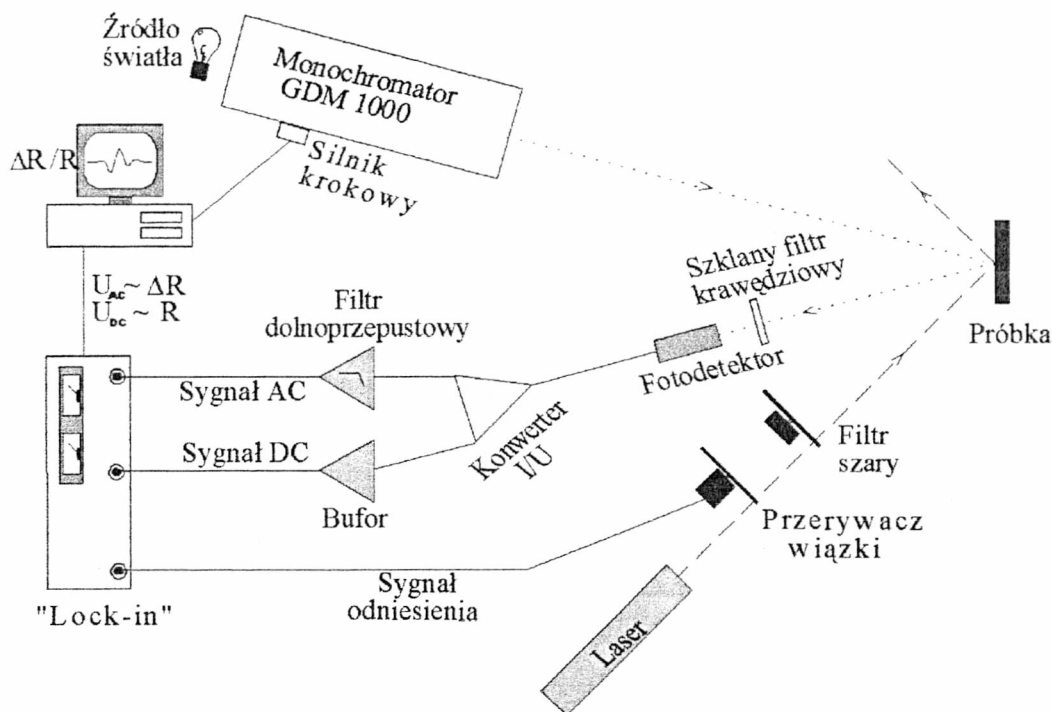
Wielkości $\Delta \epsilon_1$ i $\Delta \epsilon_2$ są ze sobą związane za pomocą relacji Kramers–Kronig.

Dla materiałów litych w pobliżu podstawowej krawędzi absorpcji $\beta \sim 0$ [73] i wtedy $\Delta R/R \sim \alpha \Delta \epsilon_1$. Jednak, w przypadku struktur wielowarstwowych, nabierają znaczenia efekty interferencyjne co powoduje, że powyższe przybliżenie nie jest właściwe i konieczne jest już rozpatrywanie pełnej zależności (7) [74]. Postać $\Delta \epsilon_1$ i $\Delta \epsilon_2$ daje się obliczyć pod warunkiem, że zadane jest konkretne zaburzenie oraz, że znane są funkcja dielektryczna i punkty krytyczne.

W przypadku stanów związanych takich jak: ekscytony, domieszki, studnie kwantowe czy niesprężone stany o wielokrotnych studniach kwantowych, zaburzające pole elektryczne nie wpływa na ruch nośników. Widmo energetyczne takich cząstek jest dyskretne. W takiej sytuacji pole elektryczne może zmieniać energię wiązania cząstek (efekt Starka). Pole elektryczne może także zmieniać intensywność danego przejścia poprzez przestrzenną separację elektronów i dziur; może również zmieniać czas życia danego stanu. W przypadku stanów związanych elektromodulacją odpowiedź otrzymujemy w postaci pierwszej pochodnej niezaburzonej funkcji dielektrycznej [75,76].

6.2.2. Spektroskopia fotoodbiciowa.

Badania spektroskopii fotoodbiciowej struktur $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ wykonano na stanowisku w Instytucie Fizyki Politechniki Wrocławskiej (rys.6.12.).



Rys. 6.12. Schemat układu pomiarowego do spektroskopii fotoodbiciowej.

Podstawowym przyrządem wchodzącym w skład stanowiska pomiarowego jest

podwójny, symetryczny monochromator siatkowy GDM–1000 firmy Carl Zeiss Jena. Rozmiar szczeliny wejściowej można zmieniać w zakresie od 0 do 100mm (wysokość) i od 0 do 3mm (szerokość). Zmianą długości fali monochromatora steruje komputer, który pozwala na minimalną zmianę długości fali o 1cm (0,124meV). Źródłem światła jest lampa halogenowa LH 31 o mocy 150W (24V).

Do pompowania używa się jednego z dwóch laserów:

- laser He–Ne firmy Melles Griota, moc 11mW, długość emitowanej fali $\lambda=632,8\text{nm}$ (1,96eV),
- laser jonowy Ar+ Innova 90 firmy Coherent jest laserem przestrajalnym, w zakresie widzialnym zwykle wykorzystywane są linie o długościach fali: 514,5nm, 488nm i 457,9nm.

Aby kontrolować moc światła laserowego, padającego na próbkę, wiązka może być osłabiana przez filtr szary o zmiennej gęstości optycznej. Aby zrealizować okresowe zmiany pola elektrycznego, wiązka światła laserowego przechodzi przez mechaniczny przerywacz mogący pracować w zakresie od 3Hz do 3kHz.

Do detekcji odbitej wiązki światła od próbki wykorzystywane są dwa rodzaje detektorów: głowica pomiarowa oparta na dwóch diodach krzemowych typu S286 firmy Hamamatsu, fotopowielacz R647P firmy Hamamatsu mogący pracować w zakresie spektralnym od 300 do 650nm (maksimum czułości przypada na długość fali 420nm).

Do pomiaru wielkości sygnałów mierzonych przez fotodetektory służy dwukanałowy nanowoltomierz selektywny typu "lock-in" o symbolu 5R–530 firmy Stanford Research Systems.

6.2.3. Wyniki pomiarów.

Pomiary widm fotoodbiciowych rozpoczęto od pomiarów pojedynczych warstw $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ o różnej zawartości InAs w stopie potrójnym (od $x=0,005$ do $x=0,15$) i różnej grubości. W celu określenia wpływu relaksacji naprężeń na jakość struktury wyznaczono parametry A – amplitudę i Γ – parametr poszerzenia dla każdej mierzonej próbki. Parametry te są elementami wzoru wykorzystywanego do przybliżania krzywej pomiarowej modelem takich struktur [77,78,73]:

$$\Delta R/R = \text{Re}[Ae^{i\Theta}(E-E_0+i\Gamma)^{-m}] \quad (8)$$

Gdzie: Θ – faza,

E_0 – energia przerwy zabronionej,

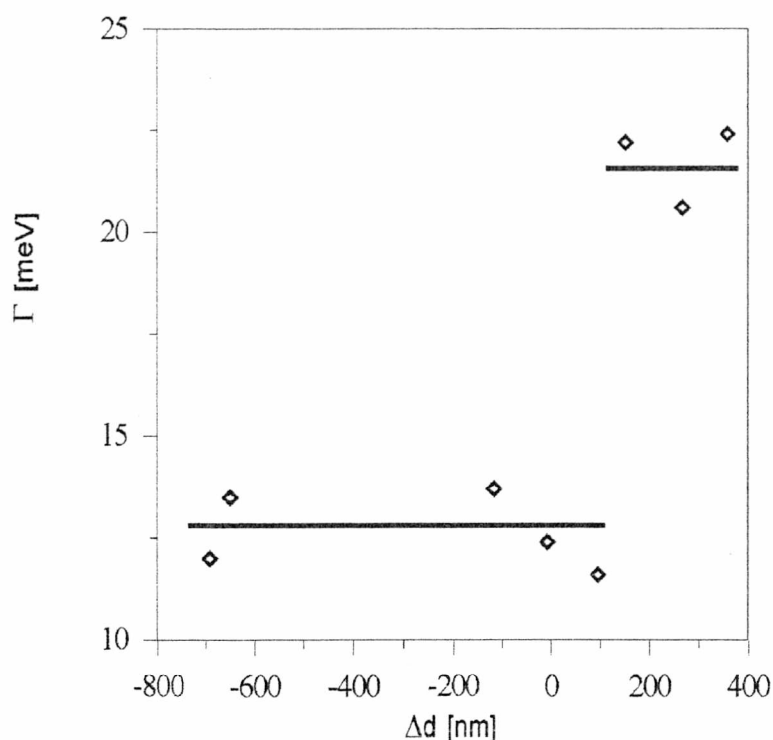
m – wykładnik zależny od rodzaju punktu krytycznego (dla prostej przerwy zabronionej $m=2,5$),

Dodatkowo, dla czytelniejszego zobrazowania wyników, wyznaczono parametr

Tabela 6.1. Wyznaczone parametry mierzonych próbek.

L.p.	Zawartość In – x	Grubość war. [nm]	Δd [nm]	Γ [meV]	Amplituda A [$\cdot 10^{-10}$]
1	0,005	438	-692	12,0	4,34
2	0,005	480	-650	13,5	5,41
3	0,01	345	-117	13,7	2,93
4	0,03	105	-7	12,4	1,22
5	0,135	168	152	22,2	1,70
6	0,13	284	267	20,6	0,73
7	0,15	372	358	22,4	1,68

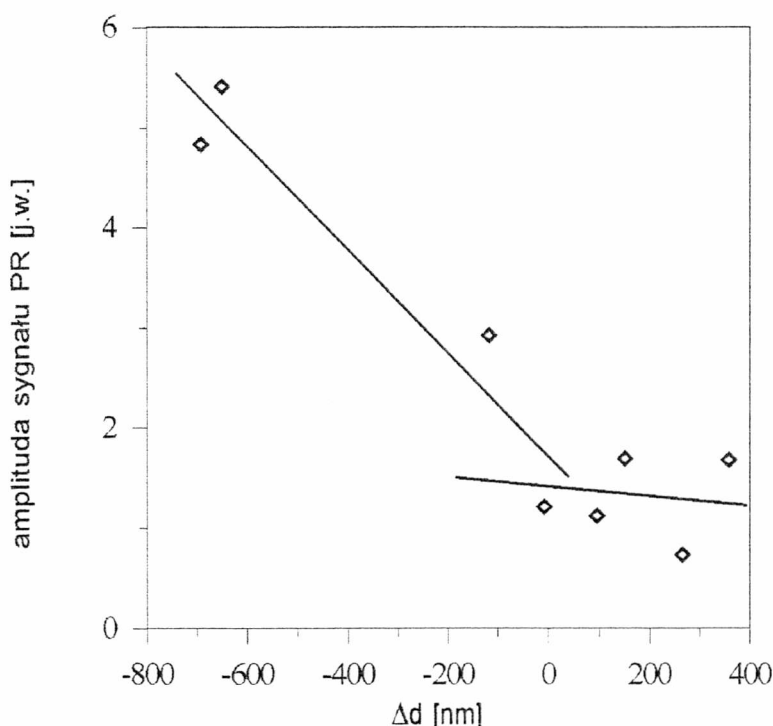
Δd , który jest różnicą między grubością warstwy epitaksjalnej, a grubością krytyczną warstwy o tym samym składzie wyznaczoną z zależności teoretycznej (rozdział 2). Wyznaczone parametry mierzonych próbek pokazane są w tabeli 6.1 [79]. Na wykresie 6.13. pokazano zależność współczynnika poszerzenia Γ od parametru Δd . Warstwy o grubości mniejszej od grubości krytycznej mają parametr Γ około 12 a warstwy o grubości większej od grubości krytycznej mają parametr Γ większy w przybliżeniu dwa razy. Na wykresie widać skok wartości tego parametru

Rys. 6.13. Zależność współczynnika poszerzenia Γ od parametru Δd .

w okolicy zera tzn. dla warstwy o grubości równej grubości krytycznej. Parametr Γ jest w przybliżeniu stały dla warstw, których $\Delta d < 0$ i również stały dla warstw

których $\Delta d > 0$ lecz o większej wartości. Można to wytłumaczyć relaksacją naprężeń warstw po przekroczeniu wartości grubości krytycznej.

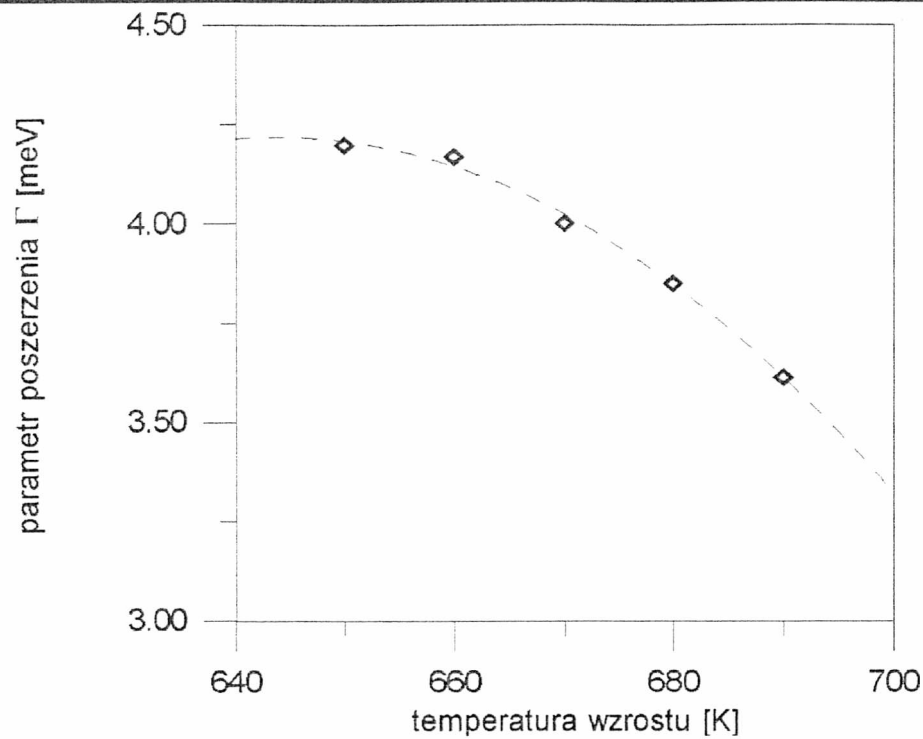
Na wykresie 6.14. pokazano zależność amplitudy sygnału PR od parametru Δd . Amplituda sygnału od warstw, których grubość jest znacznie mniejsza od grubości krytycznej, jest znacznie większa (około sześć razy) od amplitudy sygnału od warstw, których grubość jest porównywalna lub większa od grubości krytycznej. Takie zmiany amplitudy można wytłumaczyć generowanymi dyslokacjami w warstwach o grubościach większych od grubości krytycznej [80].



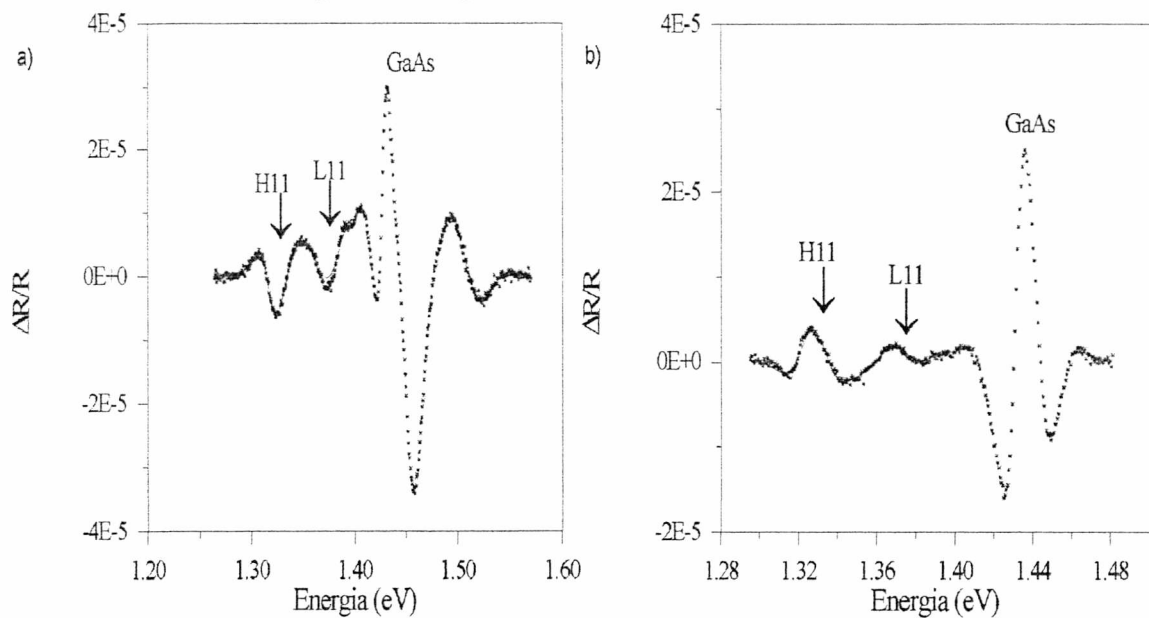
Rys. 6.14. Zależność amplitudy sygnału A od parametru Δd .

Mierzono też pojedyncze studnie kwantowe o różnej zawartości InAs w stopie potrójnym i o różnych grubościach. Wyznaczono parametr poszerzenia Γ struktur osadzanych w różnych temperaturach (od 650 do 690°C) rys.6.15. Przy zwiększaniu temperatury osadzania obserwowane jest zmniejszenie parametru Γ , co oznacza wzrost jakości struktur. Dwie próbki osadzone w temperaturach 650 i 660°C mają taki sam parametr Γ , dopiero podwyższenie temperatury procesu do 670°C zmniejsza jego wartość. Potwierdza to trafność wyboru temperatury 670°C w procesie epitaksji.

Pomiary widm PR studni kwantowych z zawartością InAs większą niż 10% pokazano na rys.6.16. Zawarte na wykresach oznaczenia Lmn i Hmn oznaczają energie przejść między poziomami pasma walencyjnego – m i przewodzenia – n, odpowiednio dla lekkich (L) i ciężkich (H) stanów dziurowych.



Rys. 6.15. Zależność parametru poszerzenia Γ od temperatury procesu osadzania.



Rys. 6.16. Pomiary widm fotoodbiciowych studni kwantowych z zawartością InAs w stopie potrójnym: a) 11,5%, b) 12,5%.

Tabela 6.2. Energie przejść wyznaczone z pomiarów widm fotoodbiciowych i z modelu.

Próbka	Przejście	Energia przejścia pomiar [eV]	Energia przejścia model [eV]
a	H11	1,328	1,327
	L11	1,371	1,371
b	H11	1,315	1,317
	L11	1,372	1,372

Wartości tych energii wyznaczone z pomiaru i z modelu oraz zawartość InAs w stopie potrójnym zawarto w tabeli 6.2 [81].

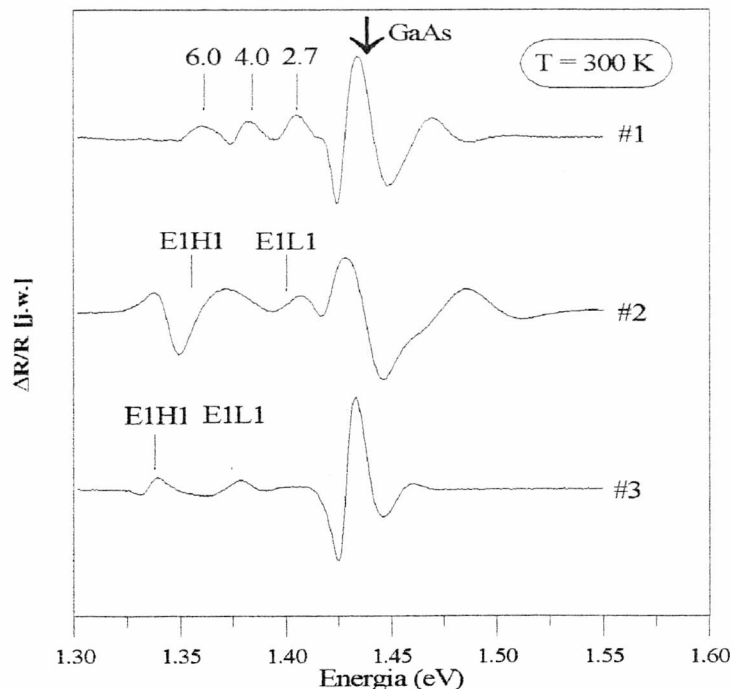
Wreszcie mierzono widma PR struktur z wielokrotnymi studniami kwantowymi przy różnych zawartościach InAs w warstwach studni i różnych grubościach studni. W tabeli 6.3 zawarte są wyniki pomiarów i projektowane, w

Tab. 6.3. Wyniki pomiarów widm fotoodbiciowych i modeli trzech struktur MQW.

L.p.	Pomiar H11 [eV]	Model H11 [eV]	Pomiar L11 [eV]	Model L11 [eV]	Skład x [%]	Grubość studni L [nm]
#1	1,406 1,384 1,363	1,404 1,386 1,366			10 (10) 10 (10) 10 (10)	2,7 (3) 4 (4) 6 (6)
#2	1,350	1,347	1,384	1,378	9,5 (10)	9,7 (10)
#3	1,334	1,335	1,375	1,370	11 (11)	9,4 (10)

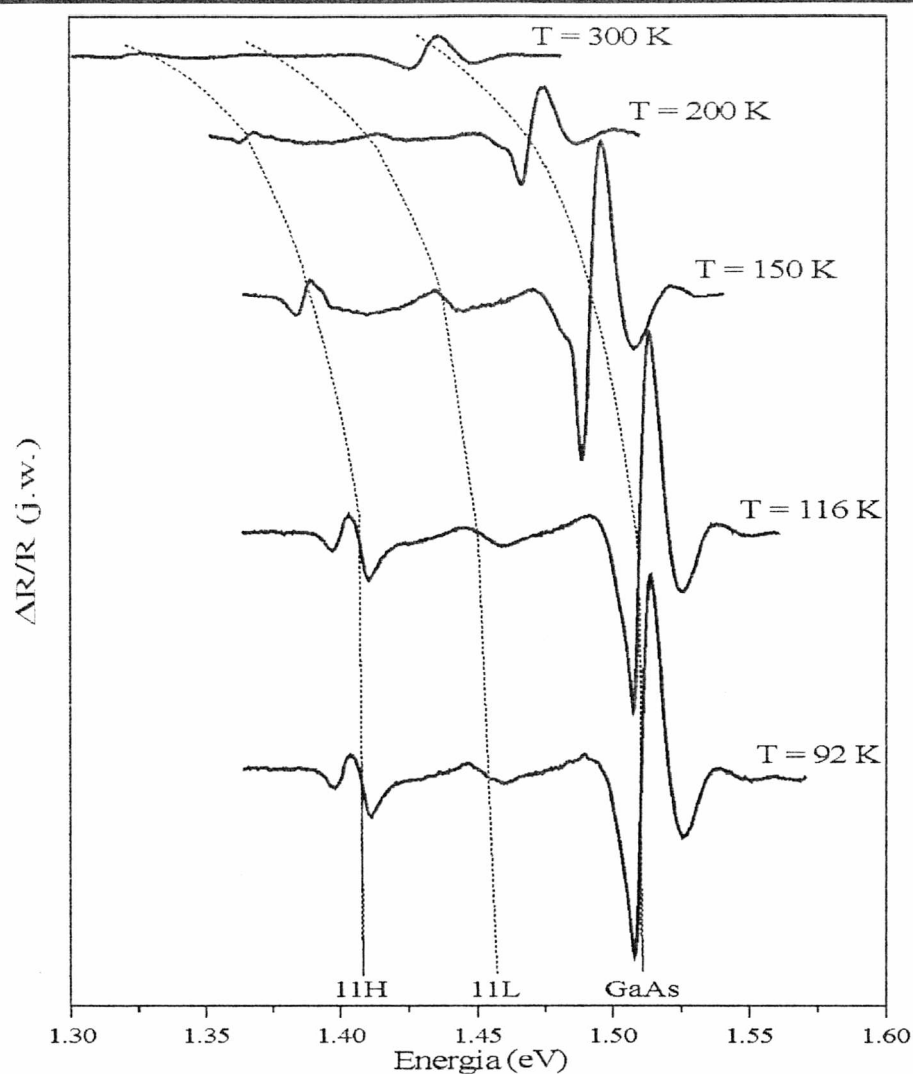
nawiasach, parametry trzech struktur MQW [82].

Struktura pierwsza składa się z trzech studni kwantowych o tym samym składzie, ale o różnych grubościach (3, 4 i 6 nm). Dwie pozostałe struktury składają się z pięciu jednakowych studni kwantowych, ale struktura trzecia zawiera więcej indu w warstwach studni. Wyniki pomiarów widm PR pokazane są na rys.6.17.

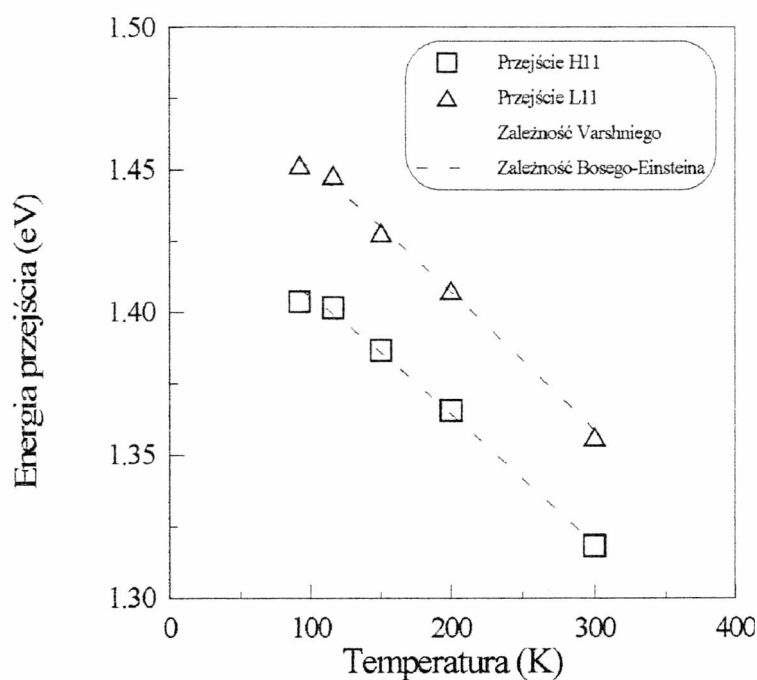


Rys. 6.17. Pomiar widm fotoodbiciowych trzech różnych struktur MQW.

Na rys.6.18. pokazano widmo PR wielokrotnej studni kwantowej o zawartości InAs w stopie potrójnym $x=0,115$, zmierzone w funkcji zmiany temperatury



Rys. 6.18. Pomiary widm fotoodbiciowych MQW w funkcji temperatury.



Rys. 6.19. Zmiany wartości energii H11 i L11 w funkcji temperatury.

Tabela 6.4. Wyznaczone z modeli parametry MQW.

Przejście	$E_0(0)$ [eV]	α [10^{-4} eV/K]	β [10^{-4} eV/K]	E_B [eV]	a_B [meV]	Θ_B [K]
H11	1,423	5,7	195	1,469	49	203
L11	1,471	6,0	181	1,519	53	206

w zakresie od 92 do 300K. Ze wzrostem temperatury pomiaru zmniejsza się amplituda sygnału i następuje przesunięcie wartości przerwy energetycznej w kierunku mniejszych energii. Na rysunku 6.19. pokazano zmiany energii przejść H11 i L11 w funkcji temperatury. Zmiany tych energii porównano z empiryczno-teoretycznymi modelami Varshni [76] i Bose–Einsteina [83]:

Tabela 6.5. Wyniki pomiarów fotoluminescencji MQW.

Próbka	Pomiar H11 [eV]	Model H11 [eV]	Skład x [%]	Grubość Studni L [nm]
#1	1,484	1,485	10 (10)	2,7 (3)
	1,469	1,469	10 (10)	4 (4)
	1,450	1,451	10 (10)	6 (6)
#2	1,437	1,437	9,5 (10)	9,7 (10)
#3	1,421	1,423	11 (11)	9,4 (10)

$$E(T) = E_0(0) - \alpha T^2 / (\beta + T) \quad (9)$$

$$E(T) = E_B - a_B \{1 + 2 / [\exp(\Theta_B / T) - 1]\} \quad (10)$$

Wyznaczone parametry E_0 , α , β i E_B , a_B , Θ_B przedstawiono w tabeli 6.4. Wartości parametrów są porównywalne z wartościami podanymi w literaturze [84,85,86] dla studni z różną zawartością InAs w stopie potrójnym [87].

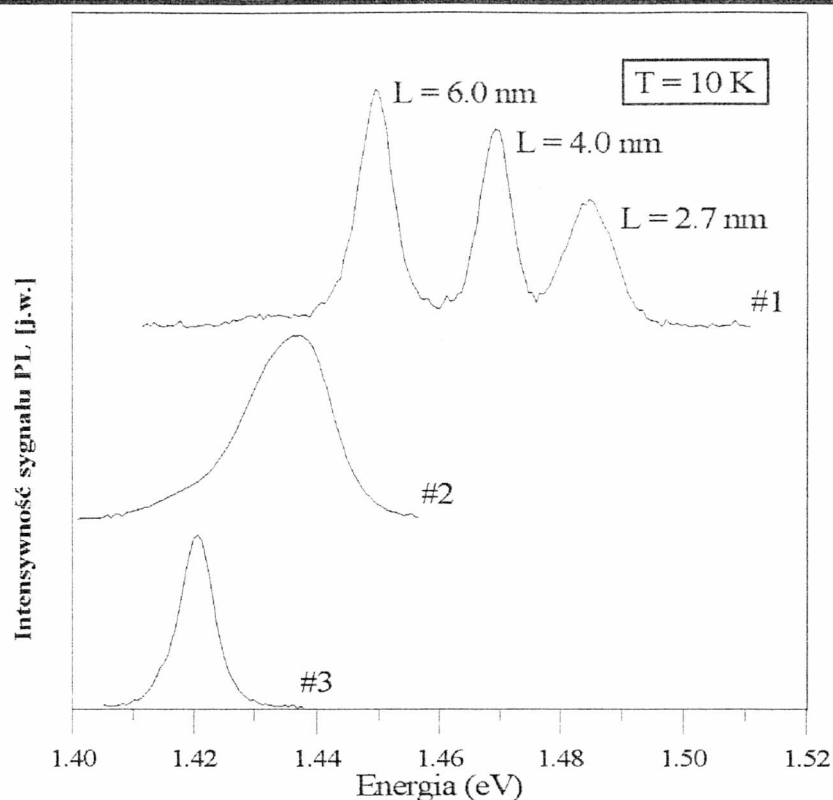
6.2.4. Pomiary fotoluminescencji wielokrotnych studni kwantowych.

Wykonano pomiary fotoluminescencji wybranych struktur MQW (tych samych, dla których mierzono widma fotoodbiciowe, podrozdział 6.2.3.c). Pomiary wykonano w temperaturze 10K. Wyniki pomiarów pokazane są na rysunku 6.20.

We wszystkich strukturach obserwowano przejście energetyczne H11, dla którego szerokość połówkowa linii emisyjnej wynosiła od 7 do 10meV. Wartości energii wyznaczone eksperymentalnie i wyliczone teoretycznie dla projektowanych parametrów struktur zestawiono w tabeli 6.5. W nawiasach podano wartości projektowane.

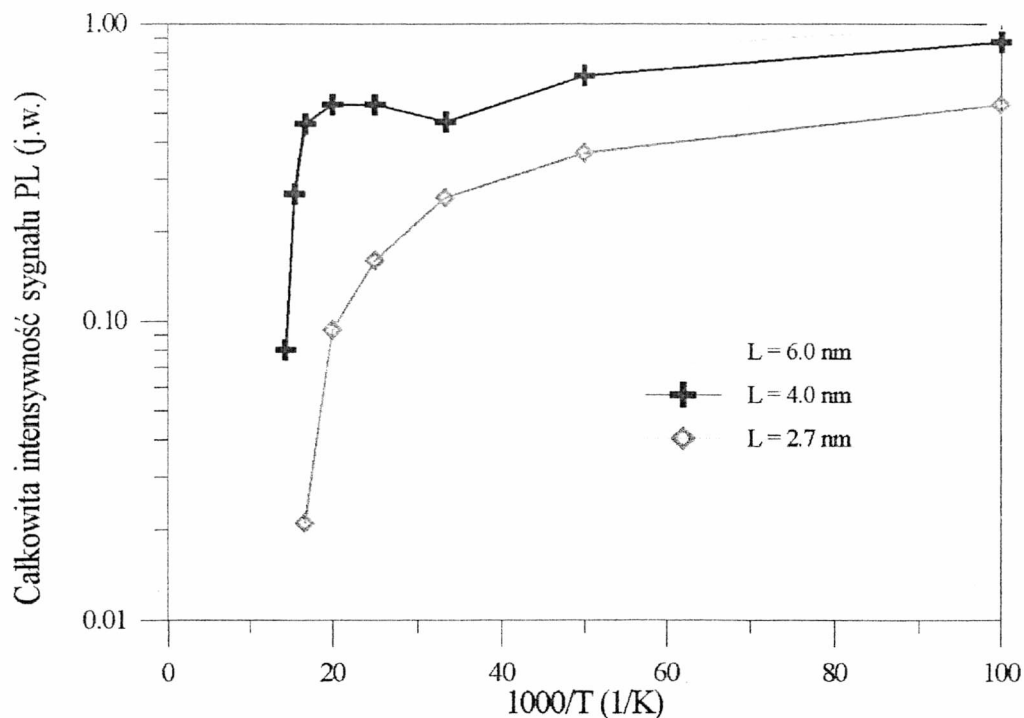
Porównanie tych wartości z odpowiadającymi im wartościami z pomiarów fotoodbiciowych (tabela 6.3.) wykazuje dużą zgodność obu rodzajów pomiarów co, potwierdza dobrą jakość wykonanych struktur.

Wykonano pomiary fotoluminescencji struktury z wielokrotną studnią



Rys. 6.20. Wyniki pomiarów fotoluminescencji struktur MQW w temperaturze 10K.

kwantową, ze zmienną szerokością studni, w zakresie temperatur od 10 do 100K. Wyniki pomiaru całkowitej intensywności fotoluminescencji pokazane są na rys.6.21. Przy wzroście temperatury od 10 do 100K następuje zmniejszanie intensywności linii emisyjnej, im szersza jest studnia tym zjawisko to zachodzi



Rys. 6.21. Pomiary całkowitej intensywności fotoluminescencji MQW.

mocniej. Jest to zjawisko typowe dla studni $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ i można je wytłumaczyć mechanizmem rekombinacji niepromienistej aktywowanej termicznie [88,89].

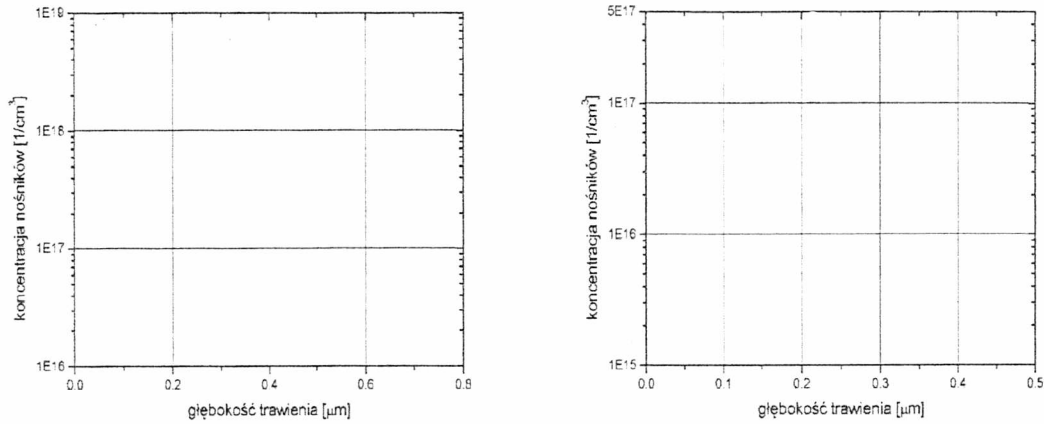
6.3. Właściwości elektrofizyczne warstw $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$.

Ostatnim elementem charakteryzacji struktur $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ były pomiary EC–V (pomiary pojemnościowo– napięciowe z trawieniem elektrochemicznym) i PVS (PhotoVoltaic Spectroscopy – spektroskopia fotowoltaiczna) wykonanych warstw.

6.3.1. Pomiary pojemnościowo – napięciowe z zastosowaniem trawienia elektrochemicznego.

Pomimo, że w większości przyrządów wykonanych w układzie materiałowym $(\text{In,Ga})\text{As}/\text{GaAs}$ wykorzystuje się warstwy niedomieszkowane to aby sprawdzić jakość otrzymanych struktur przeprowadzono pomiary EC–V warstw $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ domieszkowanych krzemem. Pomiary wykonano korzystając z zestawu pomiarowego PN4300 firmy Bio–Rad [90]. Jest to sonda elektrochemiczna, której podstawowym trybem pracy jest pomiar z trawieniem warstwy mierzonej. Kontakt Schottky’ego jest wytwarzany za pomocą elektrolitu (przy pomiarze warstw GaAs i $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ elektrolitem jest TIRON). Drugim zadaniem elektrolitu jest trawienie warstwy półprzewodnika przy odpowiedniej polaryzacji układu. W tej metodzie mierzy się cyklicznie charakterystykę pojemnościowo – napięciową, anodyzuje półprzewodnik, trawi i ponownie mierzy. Mierzona jest pojemność struktury przy określonej polaryzacji prądem stałym i zadanego wymuszenia zmiennoprądowego w miarę kolejnych trawień. Pomiar odbywa się przy jak najniższym napięciu polaryzującym, tak aby głębokość wnikania ładunku przestrzennego była najmniejsza. Dane pomiarowe przeliczane są na zależność koncentracji nośników w funkcji głębokości. Sterując grubością trawienia z niedokładnością 1nm można dokładnie mierzyć rozkład koncentracji nośników w funkcji głębokości. Dokładność obliczenia profilu $N(x)$ zależy od wartości tej koncentracji (im mniejsza koncentracja tym większa jest głębokość wnikania ładunku przestrzennego i większa średnia droga Debaya). Na rys.6.22. pokazano dwa przykładowe pomiary koncentracji nośników warstw $(\text{In,Ga})\text{As}$ domieszkowanych krzemem. Ponieważ pomiary EC–V warstw o grubości mniejszej od 50nm są bardzo trudne dlatego mierzone struktury były grubsze od tej wartości krytycznej (zawartość InAs w mierzonych warstwach 12%). Mimo dużego zdefektowania warstw dyslokacje nie miały dużego wpływu na pomiar koncentracji nośników (wartości koncentracji były porównywalne z otrzymanymi przy domieszkowaniu

GaAs w tych samych warunkach). Jakość strukturalna miała jednak wpływ na pomiar głębokości trawienia, ponieważ trawienie szybciej przebiega w strukturach zdefektowanych. Widoczne jest to szczególnie na pierwszej charakterystyce



Rys. 6.22. Przykładowe pomiary EC–V heterostruktur $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$.

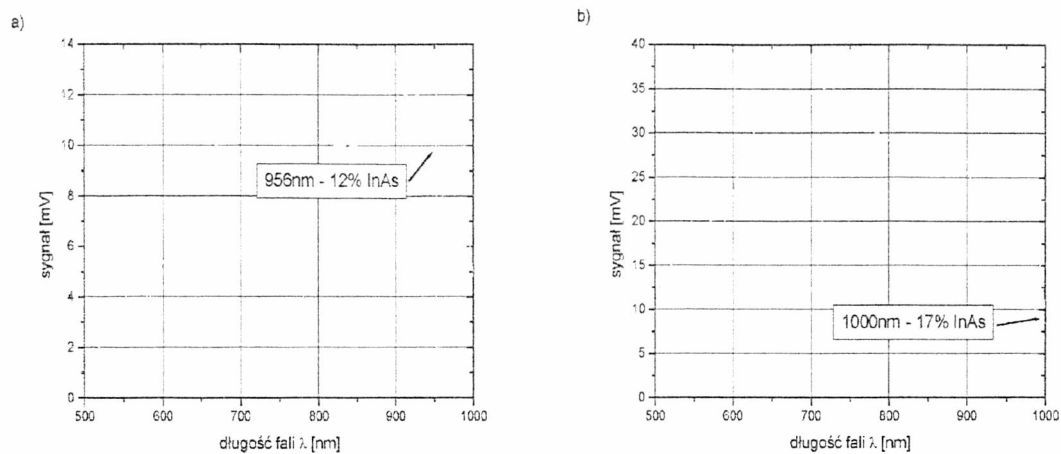
(rys.6.22.), gdzie poziom koncentracji zmniejsza się wcześniej niż następuje przejście do niedomieszkowanej warstwy buforowej GaAs.

6.3.2. Pomiary spektroskopii fotowoltaicznej.

Jednocześnie z pomiarami EC–V realizowano pomiary PVS wykorzystując również zestaw pomiarowy PN4300. Pomiar PVS polega na mierzeniu fotowoltaicznej odpowiedzi półprzewodnika na pobudzenie światłem monochromatycznym. Przy zmianie długości fali światła (dla systemu PN4300: $\lambda=500\div 1000\text{nm}$ lub $\lambda=1000\div 2000\text{nm}$) otrzymujemy widmo spektroskopii fotowoltaicznej, z którego możemy wyznaczyć długofalową krawędź absorpcji. Znając wartość energii tej krawędzi, która jest energią przerwy zabronionej półprzewodnika, można wyznaczyć skład związku potrójnego. Dla $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ korzystamy z zależności:

$$E_g = 1,424 - 1,064 \cdot x \text{ [eV]} \quad (11)$$

Ponieważ pomiar jest nieniszczący i można go przeprowadzić po przerwaniu pomiaru EC–V to możliwe jest równoczesne określenie składu warstwy związku potrójnego w miarę zagłębiania się w półprzewodnik. Na rys.6.23. pokazano wyniki pomiarów PVS dwóch przykładowych warstw $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ dla wartości $x=0,12$ – rysunek 6.23.a i $x=0,17$ – rysunek 6.23.b.



Rys. 6.23. Przykładowe pomiary PVS heterostruktur $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$.

ROZDZIAŁ VII

Charakterystyki diod LED i detektorów PIN oraz MSM.

Omówioną w poprzednich rozdziałach technologię nanostruktur InGaAs/GaAs zastosowano do wytworzenia zaawansowanych przyrządów optoelektronicznych i mikrofalowych. W badaniach, których dyskusję wyników przedstawiono wcześniej, koncentrowano się przede wszystkim na określeniu korelacji między właściwościami obszarów czynnych i parametrami procesów ich wzrostu. Wiadomo, że w procesie wytwarzania przyrządów struktura poddawana jest obróbce wysokotemperaturowej. Również podczas pracy obciążanie struktur, szczególnie dużą mocą, może w zasadniczy sposób wpływać na zmianę ich właściwości i degradację charakterystyk wyjściowych. Dlatego istotnym, z punktu oceny jakości opracowanej technologii, jest wytworzenie struktur testowych i ocena ich charakterystyk wyjściowych.

Ważnym elementem badań autora było określenie dopuszczalnej obciążalności obszaru czynnego LED zbudowanego z wielokrotnych studni kwantowych.

Zaprojektowano i wykonano:

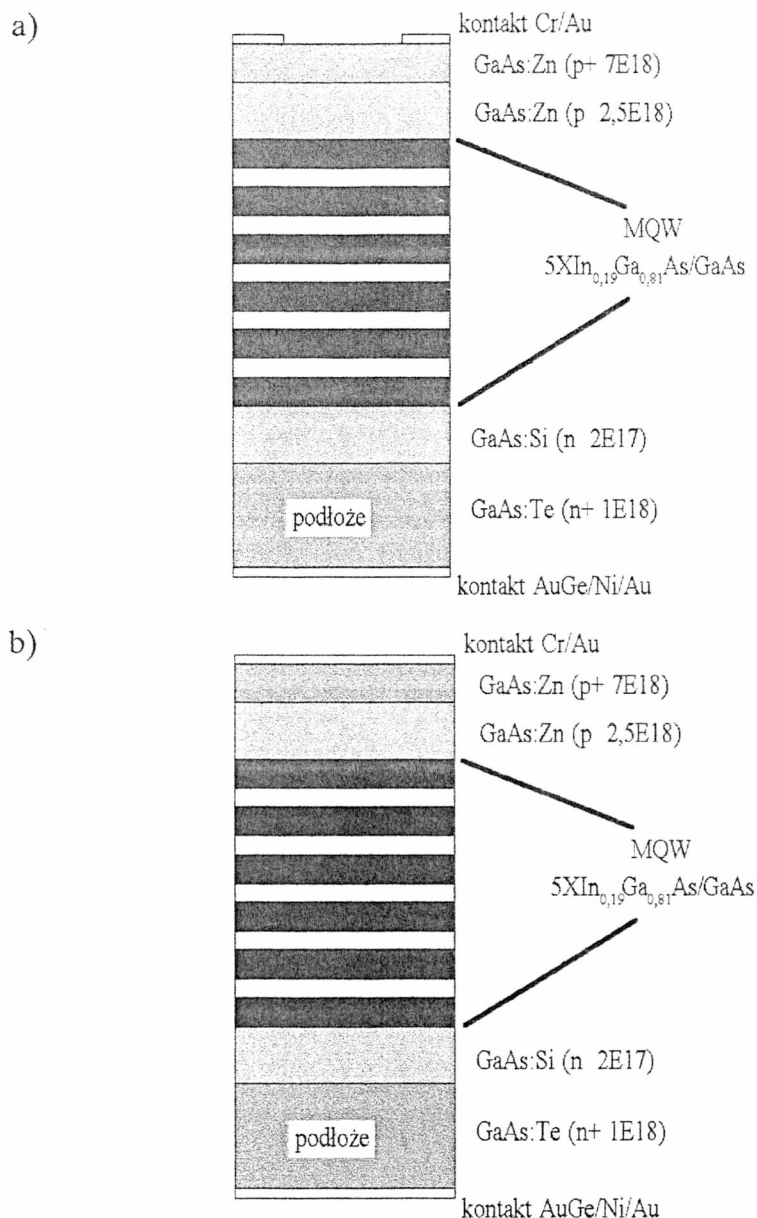
- diody LED z wyprowadzeniem fali świetlnej z powierzchni i krawędzi struktury,
- detektory typu PIN na zakres mikrofalowy,
- detektory typu MSM na zakres mikrofalowy,
- układ MOMIC – detektor MSM ze wzmacniaczem mikrofalowym.

7.1. Diody typu LED.

Strukturę diody LED, z obszarem czynnym typu MQW, zaprojektowano przy współpracy z zespołem z Instytutu Fizyki Politechniki Wrocławskiej. Schematy struktur pokazano na rys.7.1.a i 7.1.b. Zaprojektowano strukturę składającą się z czternastu warstw na podłożu arsenkowogalowym domieszkowanym telurem.

Pierwsza warstwa GaAs typu n, o koncentracji nośników $2 \cdot 10^{17} \text{cm}^{-3}$ i grubości $w=500 \text{nm}$, jest warstwą buforową. Dzięki niej polepsza się jakość następnych warstw epitaksjalnych. Stanowi ona bezpośrednią powierzchnię do osadzania heterostruktury InGaAs/GaAs.

Heterostruktura InGaAs/GaAs spełnia rolę obszaru aktywnego. Składa się



Rys. 7.1. Projekt struktury diody typu LED z obszarem aktywnym MQW: a) struktura z barierami GaAs o grubości 100nm, b) struktura z barierami GaAs o grubości 10nm.

z pięciu naprężonych studni kwantowych In_{0,19}Ga_{0,81}As (o grubości $w=10\text{nm}$ dla obu struktur) i sześciu barier GaAs (o grubości $w=100\text{nm}$ dla struktury z emisją powierzchniową i $w=10\text{nm}$ dla struktury z emisją krawędziową). Niedopasowanie sieciowe między studniami i barierami, które powoduje powstawanie naprężeń, wynosi 1,43%. Dla takiego niedopasowania grubość krytyczna, zgodnie z modelem (rozdział 2), wynosi około 10nm.

Na warstwach obszaru aktywnego osadzona jest warstwa GaAs typu p domieszkowana cynkiem o koncentracji $2,5 \cdot 10^{18}\text{cm}^{-3}$ i grubości $w=500\text{nm}$. Z warstwy tej wstrzykiwane są dziury, które rekombinują w obszarze czynnym. Jako

ostatnia w procesie epitaksji osadzana jest warstwa GaAs typu p+ domieszkowana cynkiem o koncentracji $7 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$ i grubości $w=200 \text{nm}$. Spełnia ona rolę warstwy podkontaktowej – ponieważ obniża rezystancję kontaktu.

Przed wykonaniem kontaktów próbki podzielono na mniejsze struktury i przeprowadzono ich pełną charakteryzację.

W strukturach przyrządowych na kontakty zastosowano następujące warstwy:

- Cr/Au do arsenku galu typu p,
- AuGe/Ni/Au do arsenku galu typu n.

Od dolnej strony podłoża wykonano metalizację na całej jego powierzchni, identyczną w obu strukturach. Górny kontakt, w strukturze z powierzchniową emisją światła, był taki sam jak w detektorach typu PIN. Zastosowana konfiguracja kontaktu zapewnia dobre sprzężenie ze światłowodem i jednocześnie rozwiązuje problem jego dołączenia. W strukturze z krawędziową emisją zastosowano kontakty paskowe, typowe dla konstrukcji diod laserowych.

Po naniesieniu kontaktów paskowych próbkę łamano na paski o długości odpowiadającej długości wnęki rezonansowej – odpowiedniej dla zaprojektowanej długości promieniowania. Aby otrzymać gładkie krawędzie paski muszą być prostopadłe do jednego z kierunków łatwej łupliwości GaAs ([110] lub $[1\bar{1}0]$). Strukturę łamano na paski o długości $997 \mu\text{m}$ spełniające zależność:

$$2L = \lambda/n(\lambda) \cdot m \quad (12)$$

gdzie:

- $\lambda = 1040 \text{nm}$,
- $m = 7000$,
- $n = 3,649$.

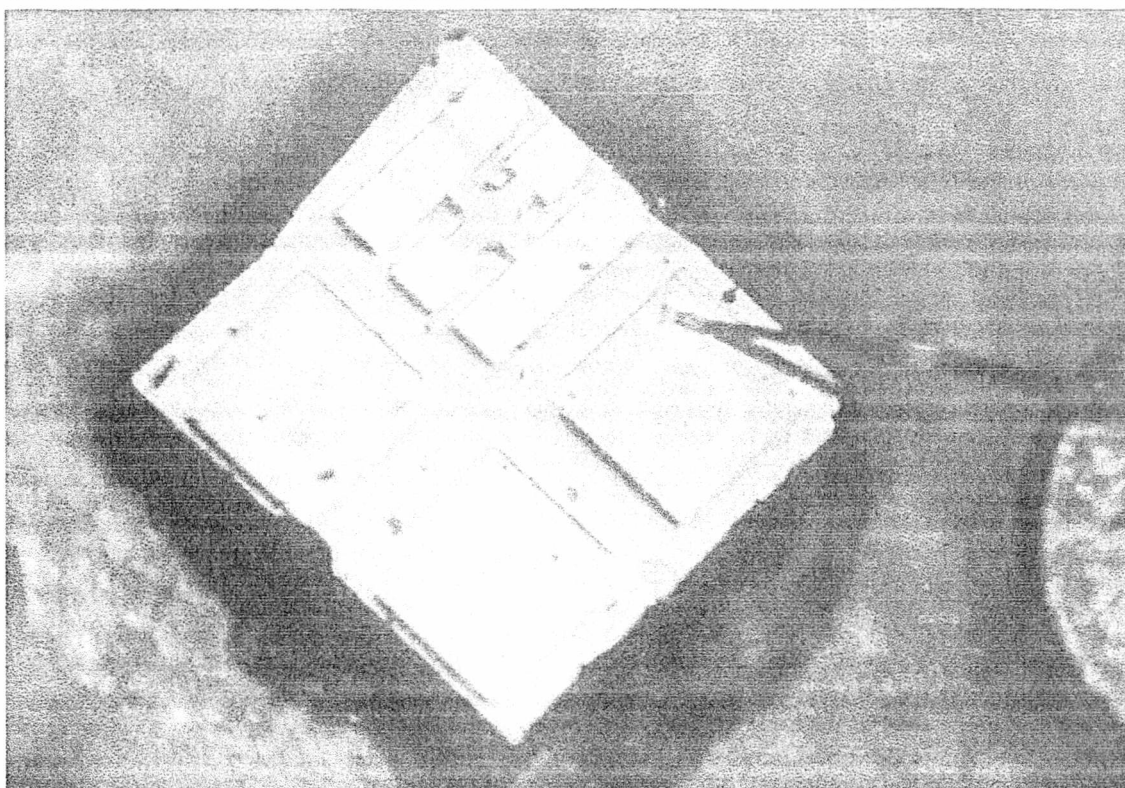
Paski o zadanej długości wykonano w Zakładzie Elektroniki Ciała Stałego Politechniki Wrocławskiej stosując nacinanie próbki laserem.

Strukturę z powierzchniowym wyprowadzeniem światła, po zamontowaniu w obudowie, pokazano na rys.7.2. Natomiast strukturę z krawędziowym wyprowadzeniem światła, po połamaniu na paski, pokazano na rys.7.3.a. i 7.3.b [89].

Do oceny parametrów wykonanych diod LED skorzystano z:

- pomiarów elektrochemicznych (EC–V). Oceniano rozkład koncentracji nośników. Dzięki temu sprawdzono poprawność wykonania poszczególnych obszarów struktury (grubość i poziom domieszkowania),
- pomiarów spektroskopii fotoodbiciowej,
- pomiarów fotoluminescencji, Dzięki temu określono długość charakterystycznej emisji światła.

Następnie mierzono rozkład koncentracji domieszek za pomocą sondy



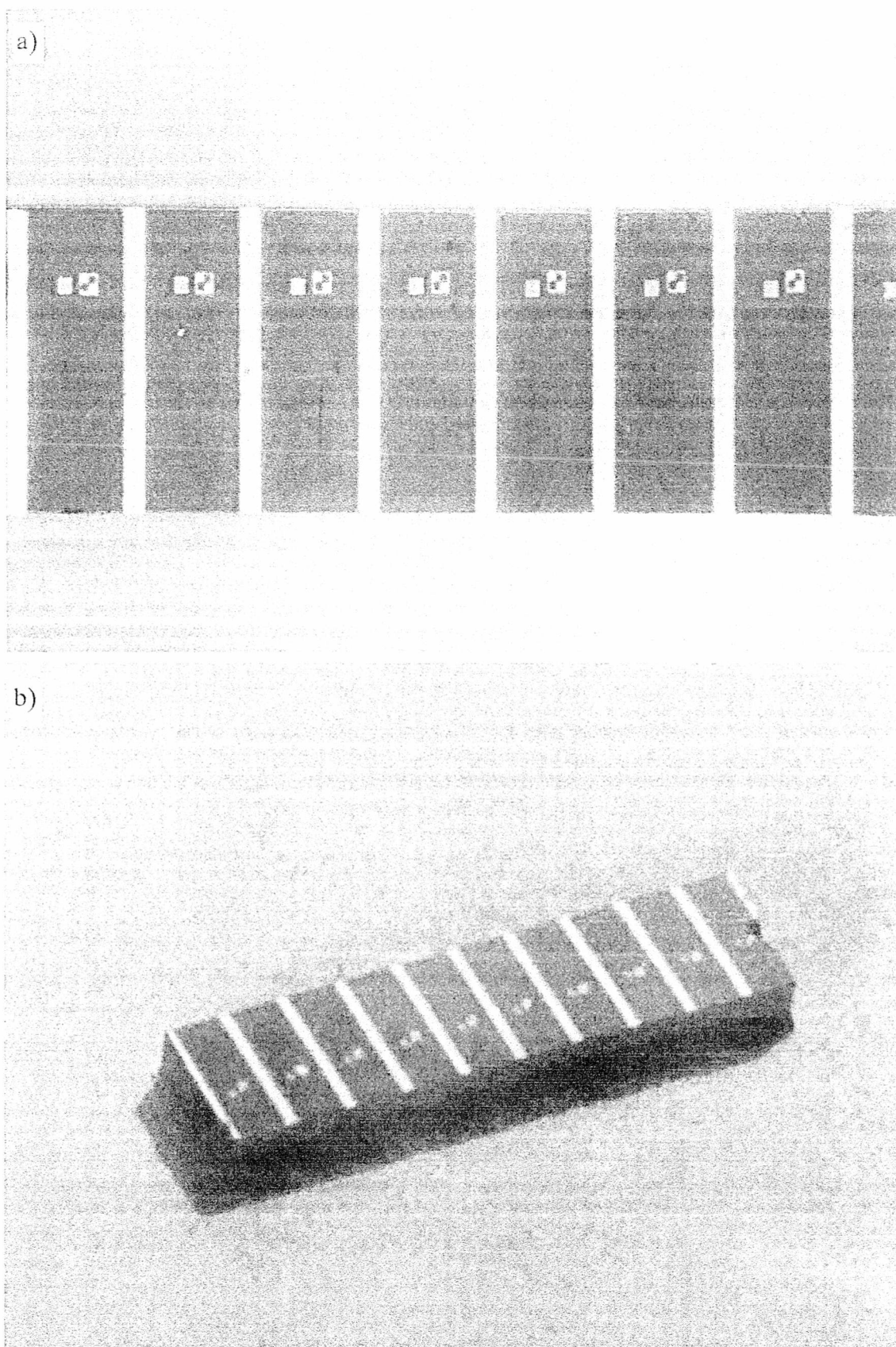
Rys. 7.2. Struktura LED z powierzchniowym wyprowadzeniem światła.

elektrochemicznej PN4300 firmy Bio– Rad z przystawką do pomiarów spektroskopii fotowoltaicznej (patrz podrozdział 6.4.). Wyniki pomiarów pokazano na rys.7.4. Potwierdzają one, że struktury wykonano zgodnie z założonymi w projekcie grubościami warstw i że uzyskano odpowiedni rozkład koncentracji domieszek.

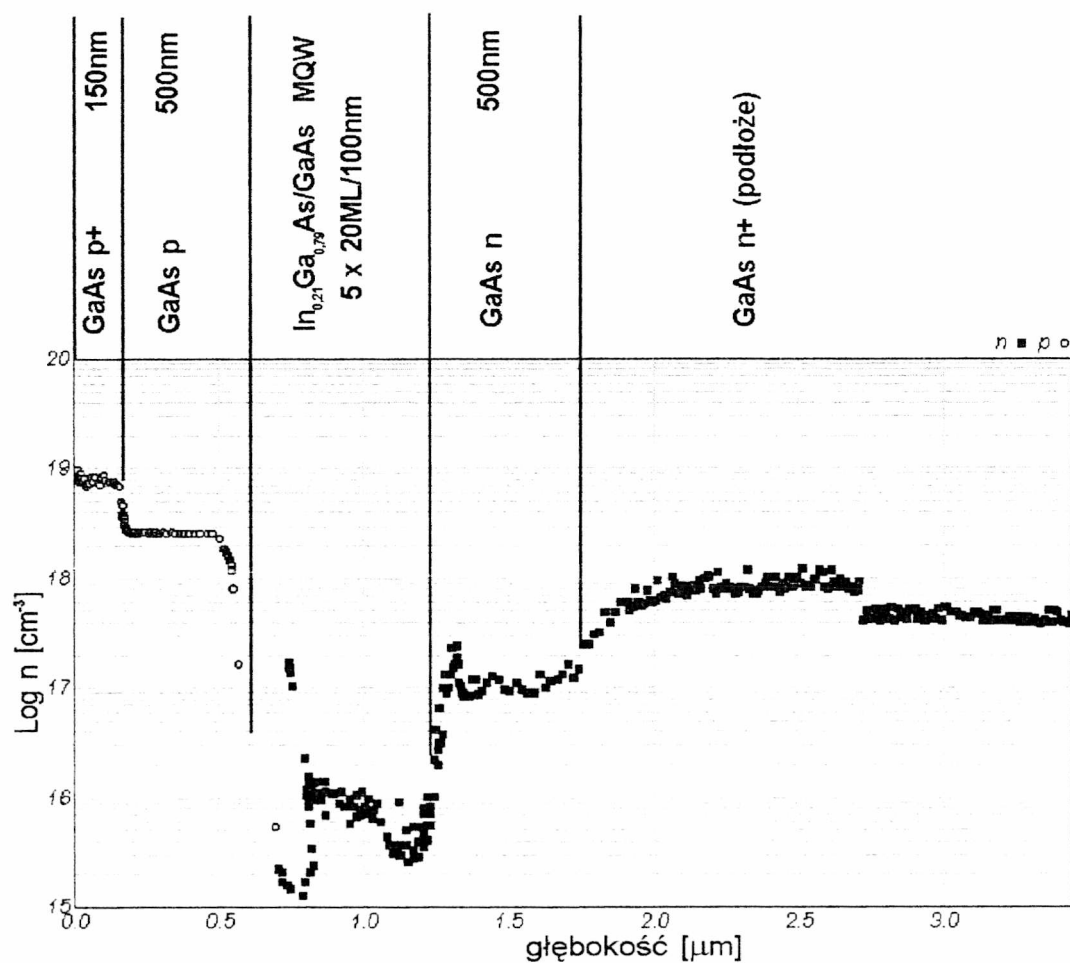
Pomiary za pomocą spektroskopii fotoodbiciowej i fotoluminescencji wykonano na stanowiskach pomiarowych w Instytucie Fizyki Politechniki Wrocławskiej (patrz podrozdział 6.2. i 6.3.). Struktury mierzono bezpośrednio po procesie epitaksji i po strawieniu warstw p i p+ GaAs.

Struktury trawiono celem zmniejszenia wbudowanego pola elektrycznego, w którym zlokalizowane są studnie kwantowe.

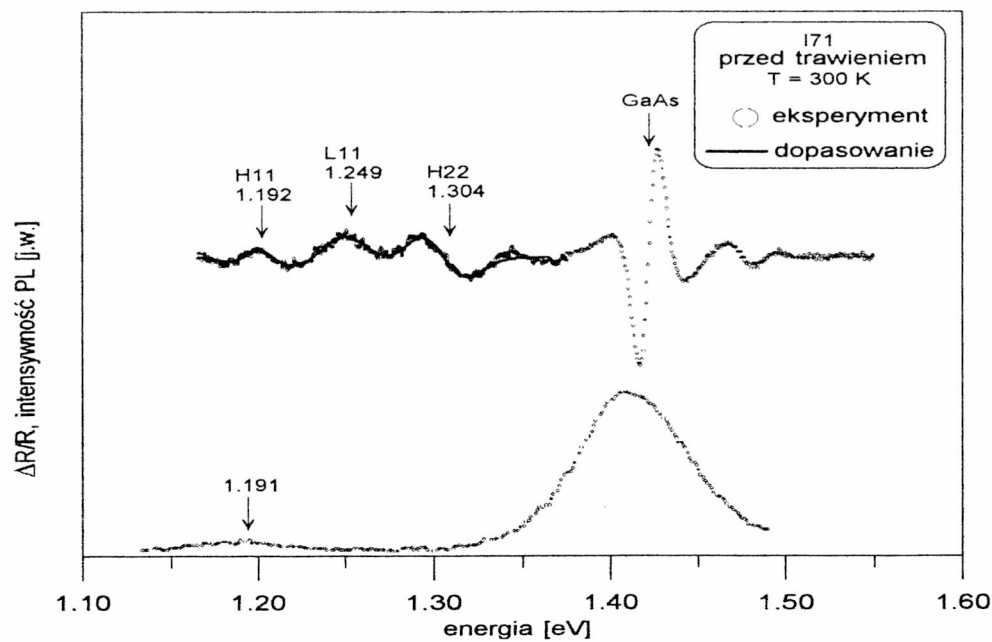
Wyniki pomiarów struktur przeznaczonych do wytworzenia diod LED z powierzchniowym wyprowadzeniem światła, przed trawieniem, pokazano na rys.7.5. Na wykresie prezentowane są również, dla porównania, wyniki obydwu pomiarów optycznych na jednej osi energii. Pomiary wykonano w temperaturze 300K. Dla widma fotoluminescencji odpowiedź od warstwy GaAs jest wyraźnie mocniejsza od odpowiedzi od studni kwantowych InGaAs. Z widma fotoodbicia widać zarówno odpowiedź od GaAs jak i od studni kwantowych. Z tych widm można wyznaczyć wartości energii dla przejścia L11, H11 i H22 ($L11=1,249\text{eV}$, $H11=1,192\text{eV}$, $H22=1,304\text{eV}$) [90].



Rys. 7.3. Struktura LED w wyprowadzeniu krawędziowym światła: a) widok z góry na kontakty paskowe, b) widok ogólny linijki diod.



Rys. 7.4. Pomiar koncentracji nośników w strukturze z powierzchniowym wyprowadzeniem światła.

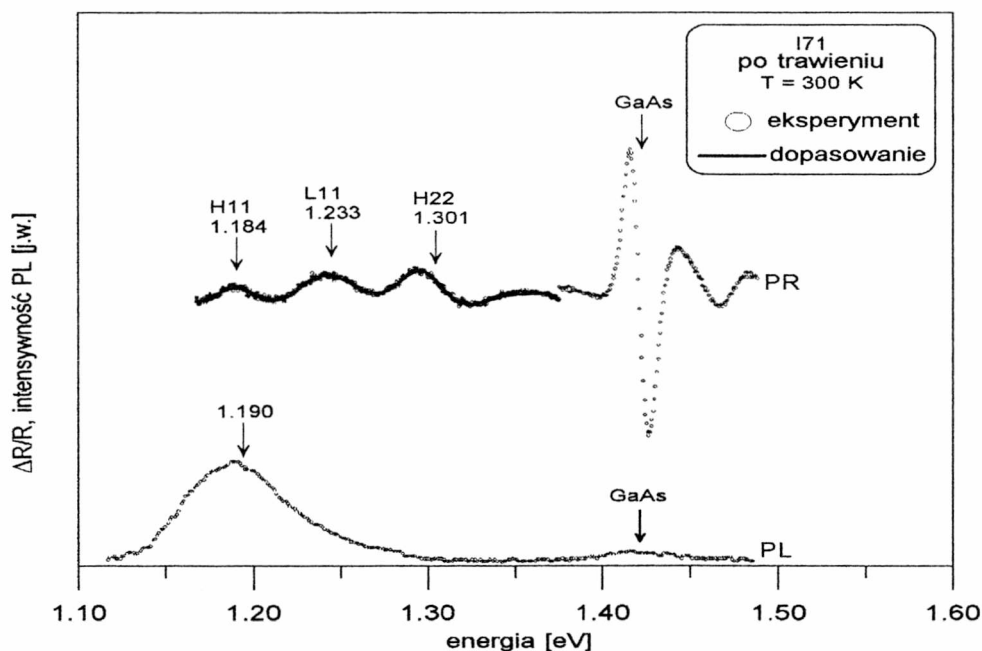


Rys. 7.5. Pomiar widma fotoodbiciowego i fotoluminescencji struktury z powierzchniowym wyprowadzeniem światła przed trawieniem.

Wyniki pomiarów struktur po strawieniu warstw GaAs p i p+ pokazane są na rys.7.6. Na tym rysunku umieszczono charakterystyki fotoodbicia i fotoluminescencji. Z widma fotoluminescencji widać, że zmniejszył się sygnał odpowiedzi od GaAs. Jest to zgodne z oczekiwaniem (w wyniku strawienia warstw GaAs), a jednocześnie znacznie wzrosła wartość sygnału od wielokrotnej studni kwantowej InGaAs. Zmniejszyła się również energia przejść w studniach kwantowych, co wskazuje na zmniejszenie się wartości wbudowanego pola elektrycznego (brak warstw GaAs typu p i p+), które oddziałują na strukturę energetyczną obszaru aktywnego [91]. Widmo fotoodbicia pokazane na rys.7.6. potwierdza również, że zmieniła się energia przejść w studniach kwantowych tzn. zmieniła się wartość pola elektrycznego w strukturze. Heterostruktury po strawieniu mierzono również w temperaturze 300K.

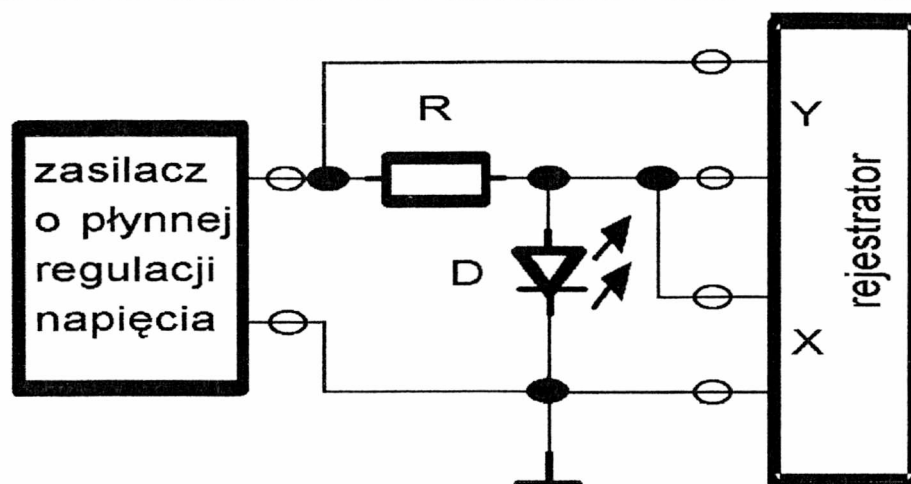
Istotnym już na etapie projektowania obszarów czynnych (szczególnie jeśli stosuje się obszary MQW) jest uwzględnianie wpływu wbudowanego pola na charakterystyki wyjściowe diod LED.

W kolejności mierzono charakterystyki prądowo–napięciowe, podzielonych na pojedyncze elementy i oprawionych w obudowy, diod elektroluminescencyjnych.

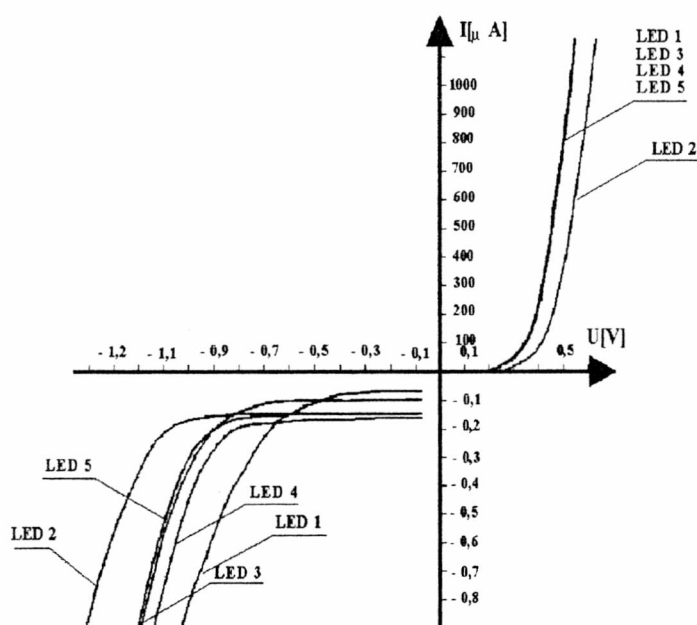


Rys. 7.6. Pomiar widma fotoodbiciowego i fotoluminescencji struktury z powierzchniowym wyprowadzeniem światła po trawieniu.

Układ pomiarowy pokazano na rys. 7.7. Prąd płynący przez diodę wyliczano pośrednio przez pomiar spadku napięcia na rezystancji $R=1\text{k}\Omega$. Wyniki pomiarów pokazano na rys.7.8. Natomiast wyniki pomiarów struktur z krawędziowym wyprowadzeniem światła pokazano na rys.7.9. Należy podkreślić, że uzyskano



Rys.7.7. Układ do pomiarów charakterystyk stałoprądowych struktur diod LED.

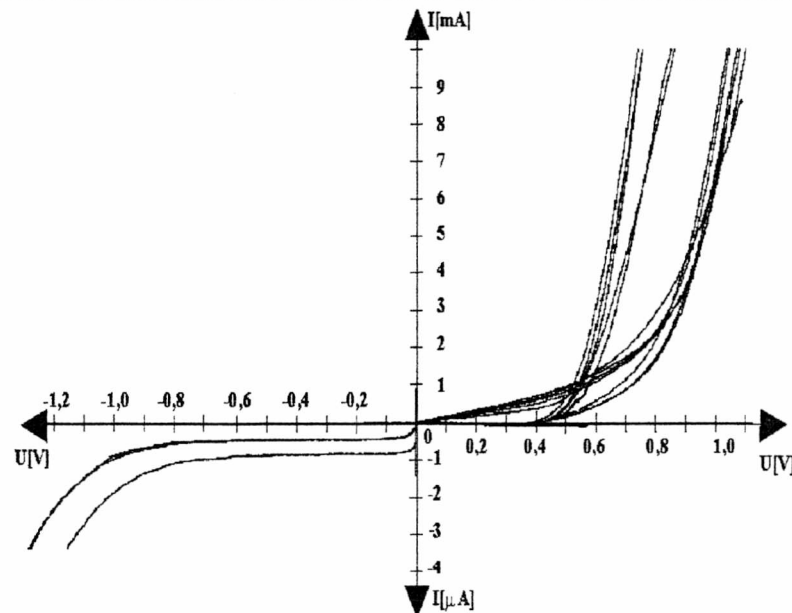


Rys. 7.8. Pomiary stałoprądowe struktur z powierzchniowym wyprowadzeniem światła.

powtarzalność charakterystyk $I-U$ zarówno w ramach jednej liniiki diod LED jak i dla różnych linejek ze źródłami światła. Stosunkowo niskie napięcie przebicia należy tłumaczyć brakiem pasywacji i zabezpieczenia struktur to zaś powoduje zbyt duże prądy upływu.

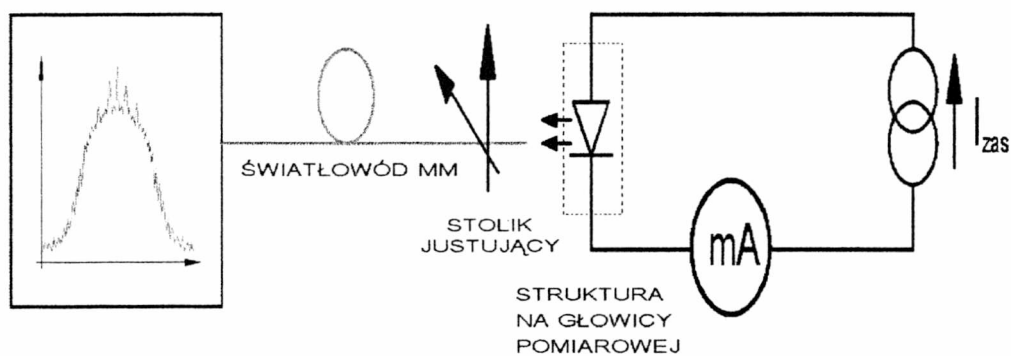
Charakterystyki widmowe struktur LED mierzono za pomocą układu, którego schemat pokazano na rys. 7.10. W układzie tym wykorzystano następujące przyrządy:

- analizator widma (Optical Spectrum Analyzer AQ-6315B prod. ANDO [92]),
- zasilacz stabilizowany (Stabilized Laser Diode Power Supply 902 i dla prądów większych niż 600 mA zasilacz Quad Power Supply KB-60-01),
- multimetr (Metex NDM M-3860D),



Rys. 7.9. Pomiary stałoprądowe struktur z krawędziowym wyprowadzeniem światła.

ANALIZATOR WIDMA



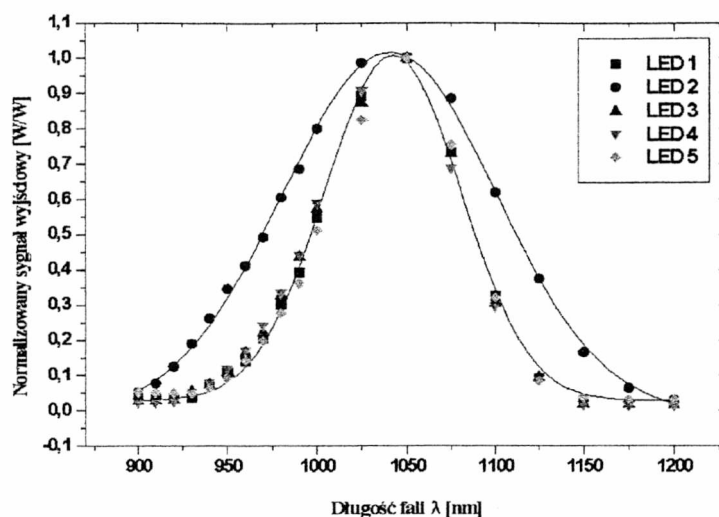
Rys. 7.10. Schemat układu do pomiaru charakterystyk widmowych.

- multimetr (Metex M-4650CR),
- konwerter mocy optycznej na napięcie (Miniature Optical Power Meter MOP_{IR} prod. NORTECH Fibtronic Inc).

Układ ten pozwala na wyznaczenie takich parametrów jak:

- długość emitowanej fali o maksymalnym natężeniu mocy optycznej (λ_{max}),
- szerokości połówkowej (FWHM) emitowanej fali,
- maksymalnej mocy optycznej w pikie ($P_{OutPeak}$),
- całkowitej mocy mierzonego widma ($P_{OutTotal}$).

Wyniki pomiarów widmowych struktur z powierzchniowym wyprowadzeniem światła pokazano na rys.7.11.



Rys. 7.11. Pomiary widmowe struktur z powierzchniowym wyprowadzeniem światła.

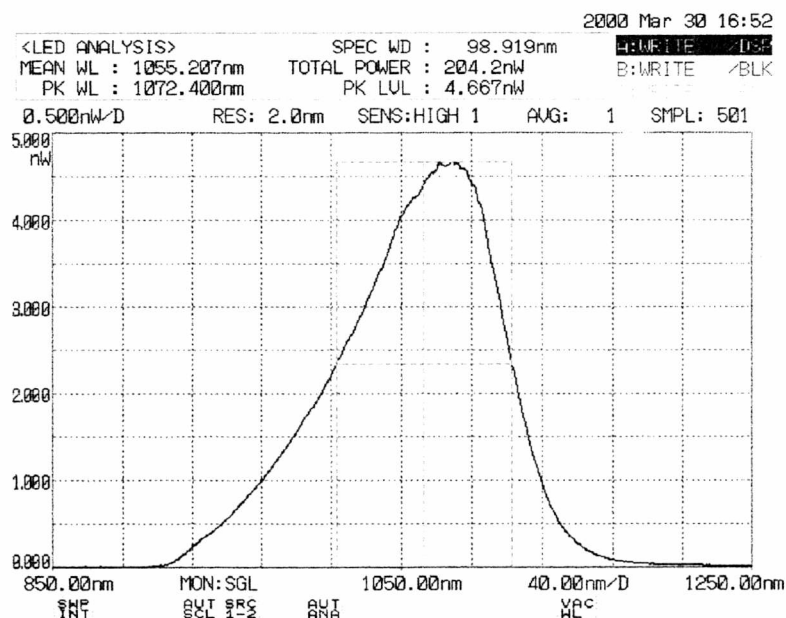
Na wykresie podano wartości znormalizowanego sygnału wyjściowego pięciu przykładowych struktur diod LED. W czterech strukturach obserwuje się powtarzalne zależności widmowe. Tylko struktura LED2 charakteryzuje się większą szerokością połówkową. Długość fali świetlnej odpowiadającej maksimum sygnału wynosi 1040nm i różni się od planowanej o około 60nm. Z badań rentgenowskich otrzymano wyniki potwierdzające dużą zgodność grubości poszczególnych studni kwantowych z grubościami projektowanymi. Wydaje się, że odstępstwo $\lambda_{\max}$ od założonej długości wynika z niedotrzymania założonego składu studni kwantowej (x w związku $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$). W trakcie badań kinetyki wzrostu złożonych struktur stwierdzono, że istotny wpływ na wynik końcowy procesów technologicznych, w przypadku technologii roztworów stałych, ma temperatura otoczenia. Niestety, ze względu na trudności w utrzymaniu stabilnej temperatury (czasami ΔT_0 wynosiła nawet 8°C) obserwowano odstępstwa parametrów struktur od planowanych. Wyniki pomiarów potwierdzają natomiast bardzo dobrą jednorodność parametrów powierzchni. Określone w trakcie badań parametry technologiczne i szybkość obrotu podłoża zapewniają wzrost struktur z kontrolą składu i grubości na poziomie 1%.

Przykładowe wyniki pomiarów widmowych struktury z krawędziowym wyprowadzeniem światła pokazano na rys.7.12.

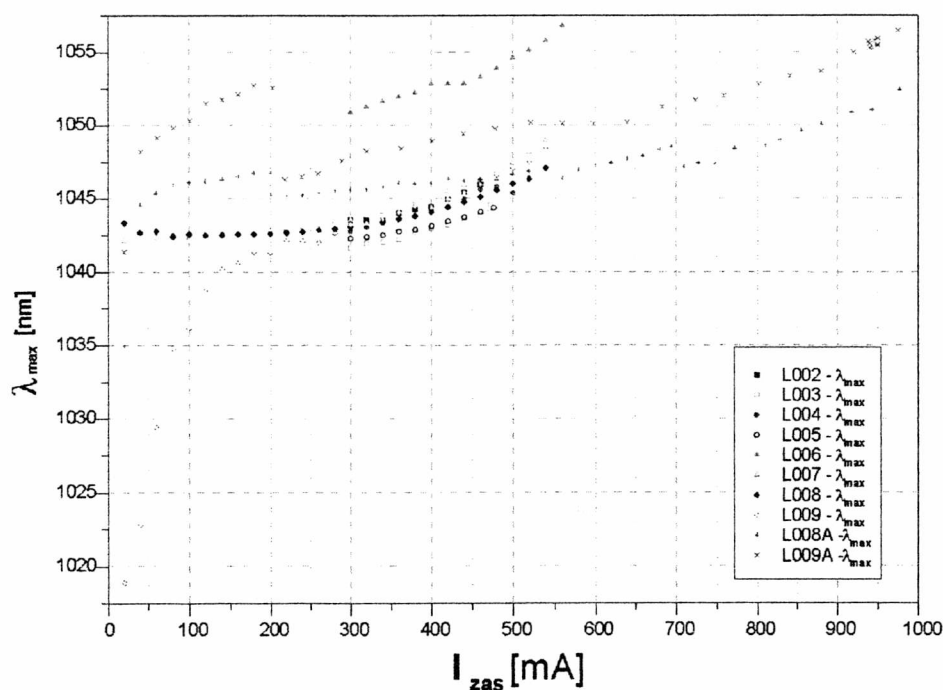
Wykonano pomiary zmiany maksymalnej długości emitowanej fali świetlnej w funkcji prądu zasilania w zakresie od 20 do 600mA. Poszczególne struktury oznaczono jako L00n gdzie n to zmiana numeru struktury. Dodatkowe oznaczenie literowe "a" określa pomiary tych samych struktur w zakresie od 20 do 1000mA.

Wyniki pomiarów pokazano na rys.7.13.

Na podstawie wyników pomiarów stwierdzono, że obszar czynny MQW zapewnia emisję fali o długości $\sim 1040\text{nm}$, podobnie jak w strukturach z emisją powierzchniową. W zakresie prądów $300\div 600\text{mA}$ wszystkie struktury zachowywały się podobnie za wyjątkiem struktury L006, której maksimum emisji różniło się o około 8nm . Wyniki drugiej serii pomiarów (L008A i L009A) różnią się od wcześniej przeprowadzonych. Ponieważ przy prądzie zasilania większym od 500mA zachodzą nieodwracalne zjawiska degradacji parametrów struktury na skutek



Rys. 7.12. Pomiar widmowy struktury z krawędziowym wyprowadzeniem światła.



Rys. 7.13. Zmiana długości fali w funkcji wartości prądu zasilającego.

Tabela 7.1. Wartości średnie długości fal $\lambda_{\max}$ i szerokości połówkowe linii emisyjnych dla wybranych wartości prądu zasilania.

	$\lambda_{\max}$ [nm] $I_{\text{zas}} = 300\text{mA}$	$\lambda_{\max}$ [nm] $I_{\text{zas}} = 400\text{mA}$	$\lambda_{\max}$ [nm] $I_{\text{zas}} = 460\text{mA}$	FWHM [nm] $I_{\text{zas}} = 300\text{mA}$	FWHM [nm] $I_{\text{zas}} = 400\text{mA}$	FWHM [nm] $I_{\text{zas}} = 460\text{mA}$
Wartość średnia	1043,880	1045,149	1046,272	76,046	81,319	86,087
Wart. minimalna	1041,615	1042,973	1043,848	72,660	75,764	81,914
Wart. maksymalna	1050,861	1052,846	1053,265	77,757	84,177	89,222
$\Delta = (\max - \min)/2 $	4,623	4,937	4,709	2,549	4,207	3,654
$ \Delta / \text{wart.śr.} \times 100\%$	0,443	0,472	0,450	3,351	5,173	4,245

Legenda:

$D = |(\max - \min)/2|$ – rozrzut wartości parametru,

$|D / \text{wart.śr.}| \times 100\%$ – odchyłka procentowa od wartości średniej
wyznaczonego parametru.

silnego przegrzewania. Na podstawie otrzymanych wyników wyznaczono szerokość połówkową widma poszczególnych struktur w funkcji wartości prądu zasilającego (rys.7.14). Na wykresie tym widać również wpływ przeciążenia temperaturowego podczas pierwszego pomiaru. Obliczone średnie wartości $\lambda_{\max}$ i szerokości połówkowe zebrano w tabeli 7.1. Największe różnice występują dla $I_{\text{zas}} = 400\text{mA}$ ($\Delta\lambda = 0,472\%$ i $\Delta\text{FWHM} = 5,173\%$).

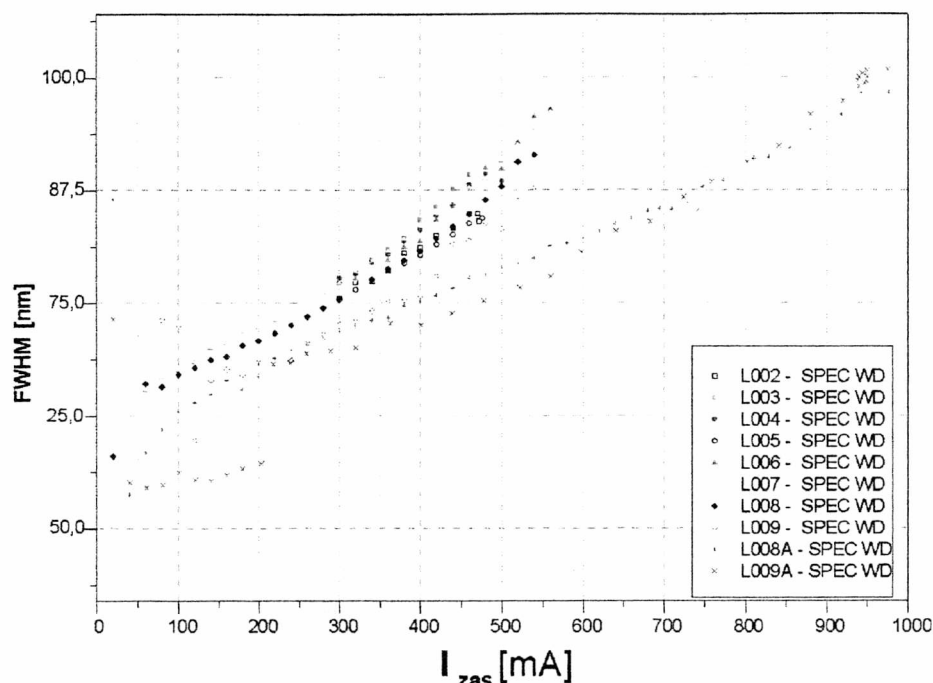
Moc wyjściową mierzono za pomocą tego samego układu. Mierząc diody z powierzchniowym wyprowadzeniem światła, światłowód ustawiano prostopadle do powierzchni struktury – czyli emitowana moc była zbierana z jednej strony struktury. Pomiar wykonano dwukrotnie. Pierwszy pomiar przeprowadzono chłodząc strukturę azotem. Wyniki pomiarów dla kilku wartości prądów zasilających pokazano na rys.7.15.

Drugi pomiar wykonano w powietrzu. Wyniki pomiarów pokazano na rys.7.16. Z tych pomiarów wyznaczono zależność całkowitej mocy wyjściowej skupionej w całym widmie emisyjnym diody, sprzęganej do użytego światłowodu wielomodowego, w funkcji prądu zasilania. Zależności te pokazano na rys. 7.17.

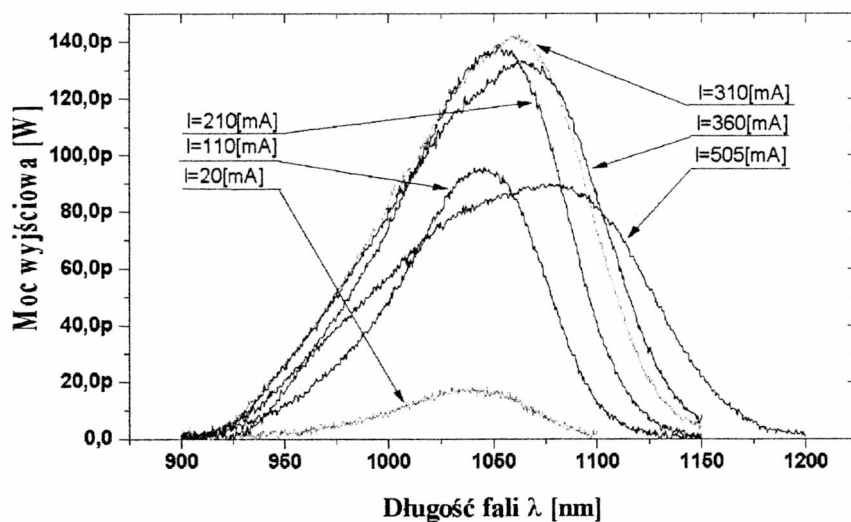
Nie zauważono istotnych zmian w charakterystykach struktury chłodzonej i niechłodzonej. Świadczy to o dobrej jakości struktury epitaksjalnej, która poddawana wielokrotnym procesom nagrzewania i studzenia nie zmieniała swoich właściwości pod wpływem obciążenia.

Pomiar mocy wyjściowej struktur z krawędziowym wyprowadzeniem światła przeprowadzono bez chłodzenia strumieniem azotu. Wykonano głowicę–radiator, której celem było częściowe stabilizowanie temperatury struktury w czasie

pomiarów. Głowicę z zamontowaną strukturą pokazano na rys.7.18.



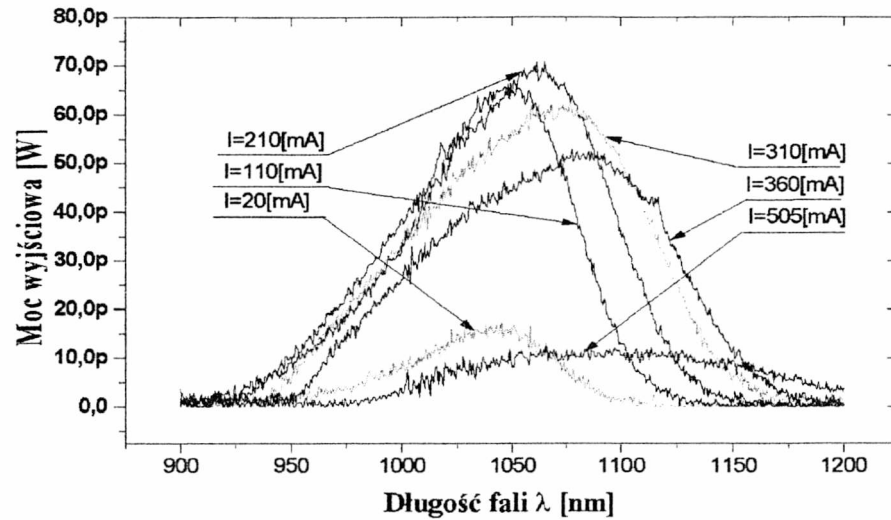
Rys. 7.14. Zmiana szerokości połówkowej widna w funkcji wartości prądu zasilającego.



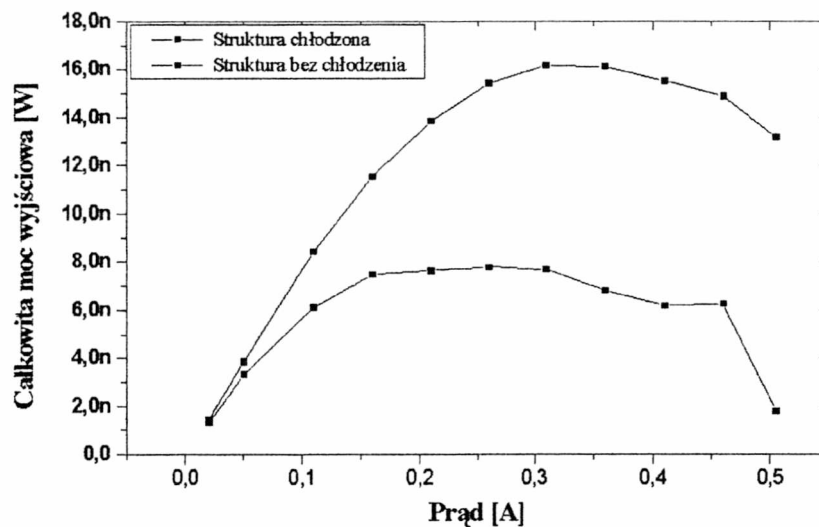
Rys. 7.15. Pomiar mocy wyjściowej struktury z powierzchniowym wyprowadzeniem światła z zastosowanym chłodzeniem.

Mierzono dwa rodzaje mocy wyjściowej: moc w pikie i moc całkowitą. Analizator zapewnia wyznaczenie wartości zarówno mocy w pikie o największym natężeniu mocy optycznej jak i obliczenie mocy emitowanego widma. Na rys.7.19. pokazano wpływ wartości prądu zasilania na emitowaną ze struktury moc w pikie dla λ_{max} .

Z powyższych charakterystyk widać, że ma miejsce rozrzut wartości mocy przy



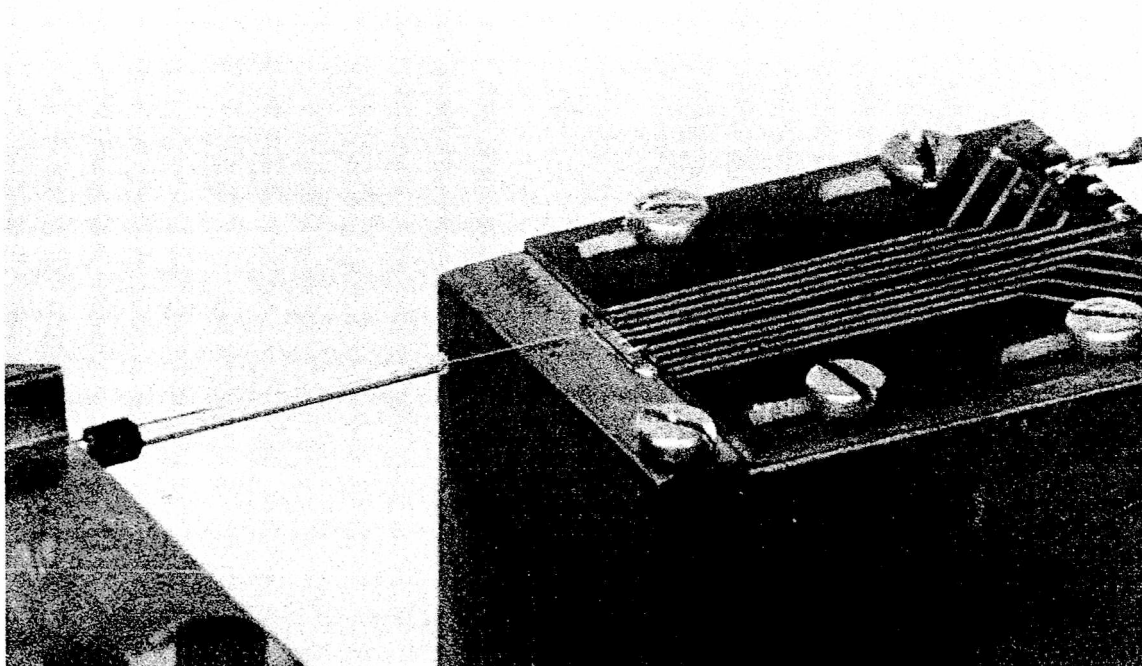
Rys. 7.16. Pomiar mocy wyjściowej struktury z powierzchniowym wyprowadzeniem światła w powietrzu.



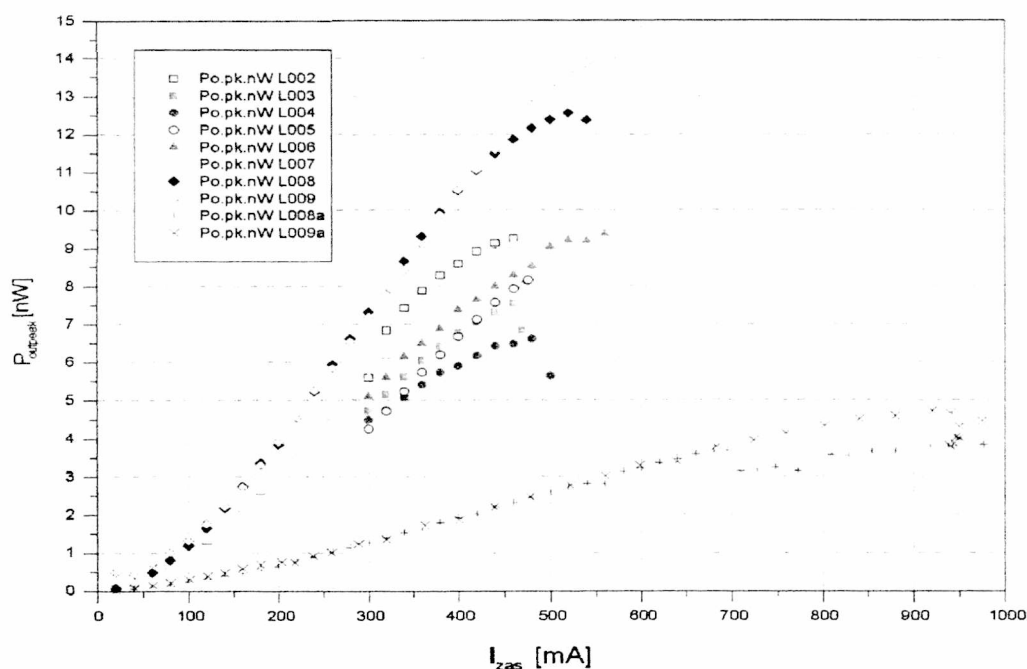
Rys. 7.17. Całkowita moc wyjściowa struktury z powierzchniowym wyprowadzeniem światła w funkcji prądu wzbudzenia.

większych prądach zasilania. Przy mniejszych prądach, wartości mocy są porównywalne. Struktury mierzone po raz drugi w zakresie od 20 do 1000mA charakteryzowały się znacznym spadkiem mocy. Potwierdza to wcześniejsze obserwacje, że istotne zmiany w strukturze wystąpiły przy stosowaniu zasilania prądem większym od 500mA. Wartość emitowanej mocy zmniejszyła się czterokrotnie.

Wyniki pomiarów całkowitej mocy emitowanej pokazano na rys.7.20. W zak-



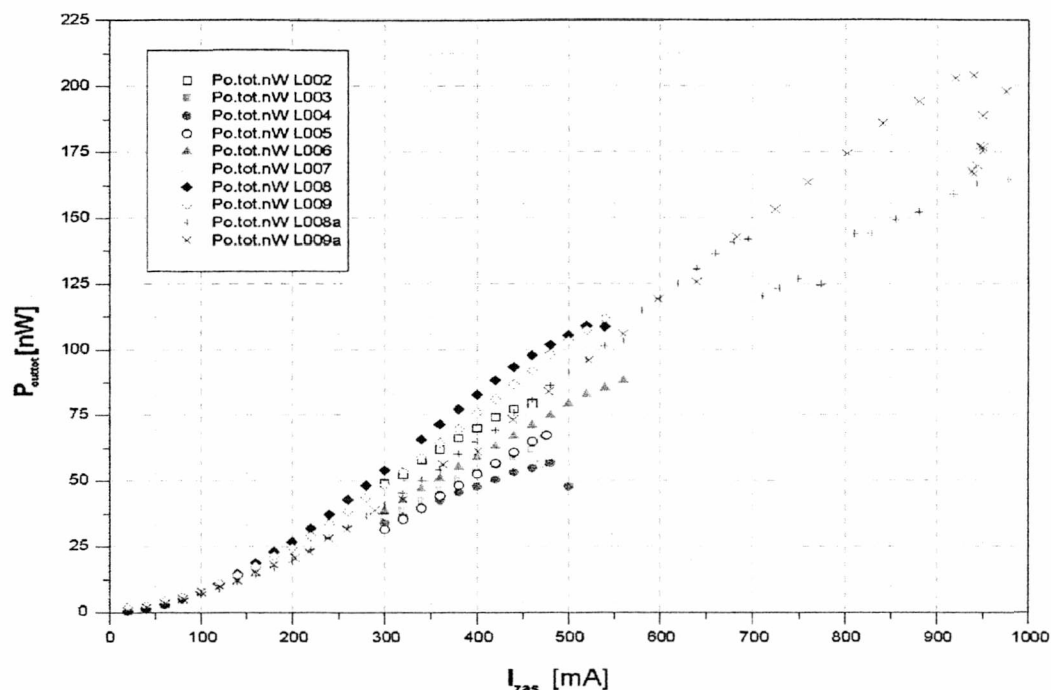
Rys. 7.18. Widok głowicy pomiarowej z zamocowaną strukturą.



Rys. 7.19. Zależność mocy optycznej w pikie od wartości prądu zasilającego.

resie prądów zasilania od 20 do 250mA wartość mocy emitowanej jest prównywalna we wszystkich strukturach. Przy większych wartościach prądu różnice między strukturami powiększały się i dochodziły do 50% wartości maksymalnych. Warto zauważyć, że w strukturach mierzonych w większym zakresie prądu zasilającego nie zaobserwowano zmniejszenia się wartości mocy całkowitej, mimo że moc w pikie znacznie zmalała. Znaczy to, że zwiększyła się szerokość połówkowa charakterystyki

mocowej.



Rys. 7.20. Zależność całkowitej mocy optycznej od wartości prądu zasilającego.

Wnioski.

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że wytworzone struktury obszarów czynnych MQW wytrzymują obciążenie prądowe do 500mA bez zauważalnych nieodwracalnych zmian ich właściwości. Potwierdza to już wcześniej prezentowane wnioski, że zastosowane pięciokrotne studnie kwantowe charakteryzują się bardzo małym stopniem zdefektowania (tzn. wysoką jakością strukturalną) i bardzo dobrą jakością międzypowierzchni. Jest to szczególnie ważne w strukturach przeznaczonych do konstrukcji źródeł laserowych, dla których czas życia (stopień degradacji) jest dla odbiorcy jednym z najważniejszych parametrów.

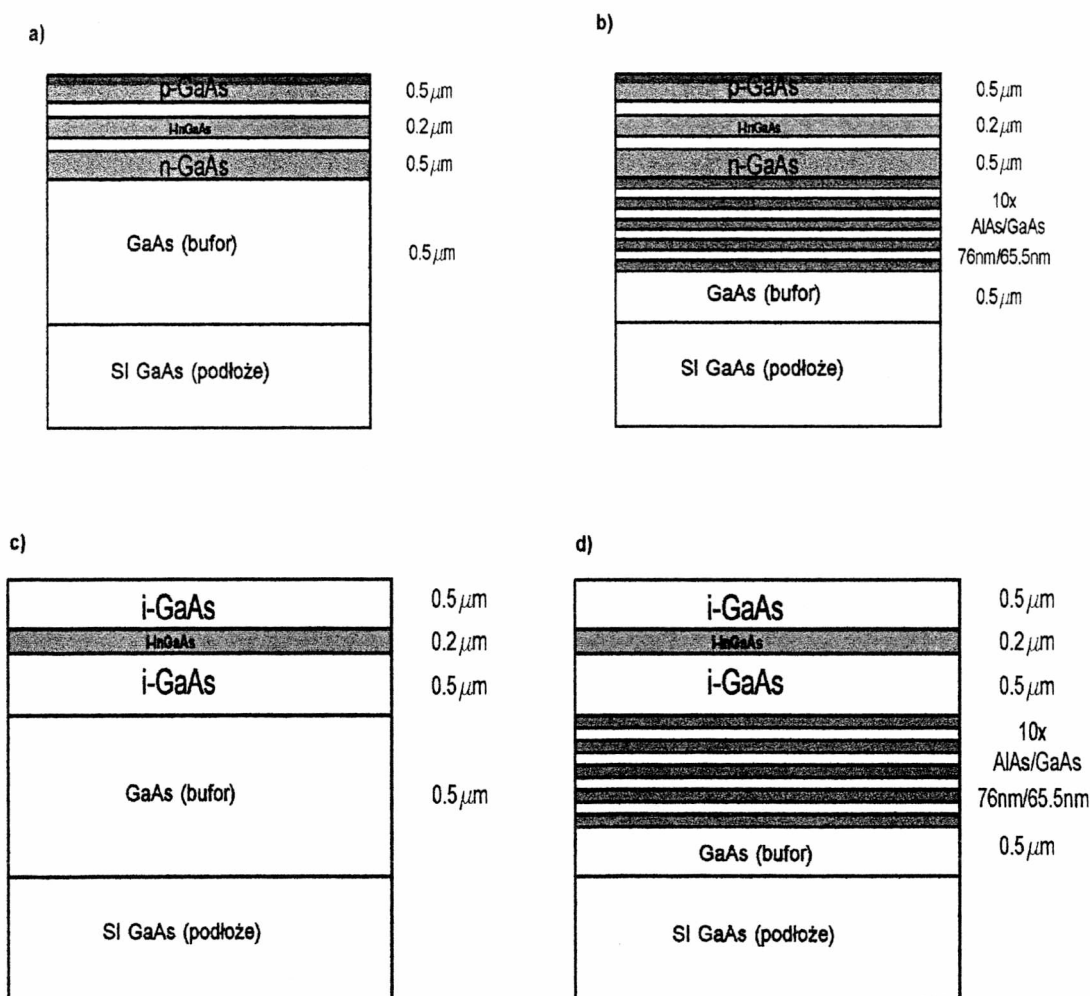
Opracowana technologia może być więc z powodzeniem zastosowana do wytwarzania prototypowych źródeł światła dużej mocy, pracujących impulsowo, gdzie zasilanie w impulsie znacznie przekracza wartość 1A. Celowym jednak byłoby przeprowadzenie długoczasowych badań starzeniowych. Dzięki temu uzyskanoby informację o procesach propagacji defektów, szczególnie od podłoża.

7.2. Detektory typu PIN i MSM.

Struktury detektorów typu PIN i MSM zaprojektowano i wykonano w Instytucie Techniki Mikrosystemów. Oba rodzaje detektorów wykonano w dwóch konfiguracjach:

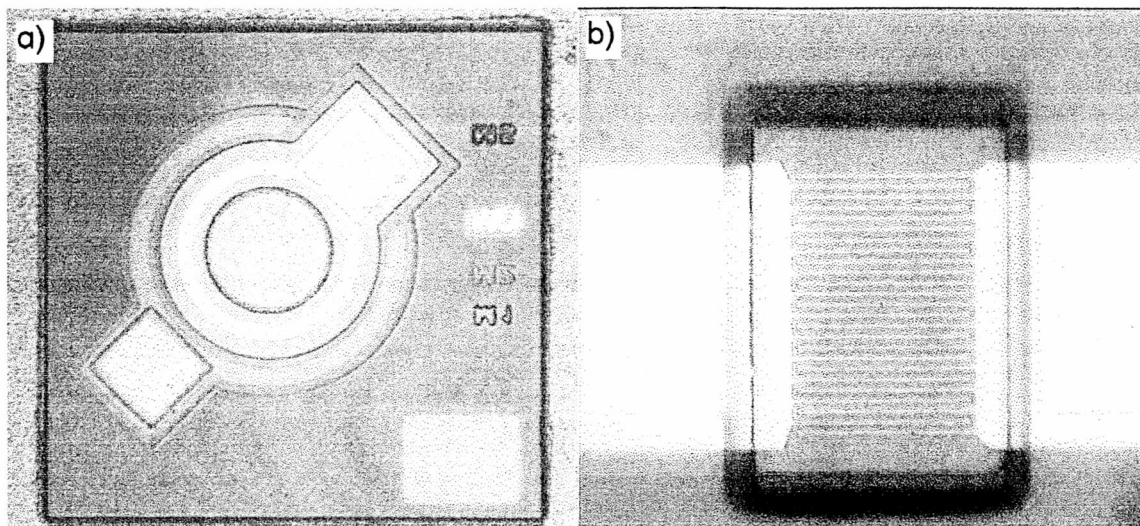
- detektory tradycyjne na podłożach GaAs SI,
- detektory RCE na podłożach GaAs SI z pojedynczym zwierciadłem Bragga.

W celach porównawczych struktury detektorów o jednakowej konfiguracji, wykonywano w jednym procesie epitaksji na obu rodzajach podłoży. Umożliwiło to bezpośrednie określenie wpływu struktury RCE ze zwierciadłem Bragga na parametry detektora i porównanie ich parametrów. Struktury detektorów pokazana rys.7.21. Na rysunku 7.21.a i b pokazano detektor PIN i RCE PIN. Na rysunku 7.21c i d pokazano detektory MSM i RCE MSM. Warstwa aktywna $\text{In}_{0,07}\text{Ga}_{0,93}\text{As}$ osadzona na warstwie buforowej GaAs jest znacznie cieńsza niż warstwa aktywna tradycyjnego detektora PIN i MSM. Skraca to znacznie czas procesu epitaksji i obniża koszt jego wytworzenia. Na górnej powierzchni struktury detektora MSM osadzono niedomieszkowaną warstwę GaAs, na której naniesiono metalizację (kontakt Schottky'ego). Wszystkie detektory wykonano w technice planarnej, a zdjęcia gotowych przyrządów pokazano na rysunkach 7.22.a i b. Detektory MSM wykonano stosując metalizację palczastą, a detektory PIN



Rys.7.21. Schematy struktur detektorów: a) PIN; b) RCE PIN; c) MSM; d) RCE MSM.

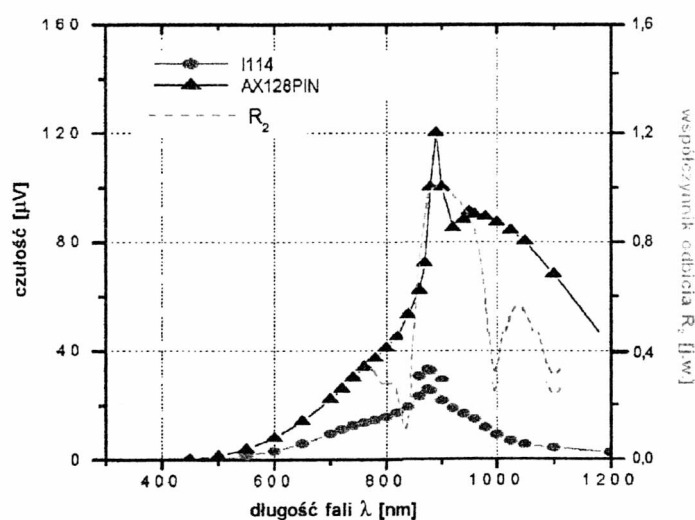
zaprojektowano tak, aby spełniały wymagania bezpośredniego podłączenia do światłowodu. Wykonano pomiary spektralne wytworzonych detektorów w celu



Rys. 7.22. Zdjęcia wykonanych detektorów: a) PIN, b) MSM.

określenia przesunięcia krawędzi absorpcji, dla różnych zawartości InAs, w stosunku do detektorów z warstwą aktywną z arsenku galu. Jednocześnie porównano charakterystyki dwóch takich samych struktur detektorów osadzonych na różnych podłożach (z reflektorem i bez reflektora Bragga).

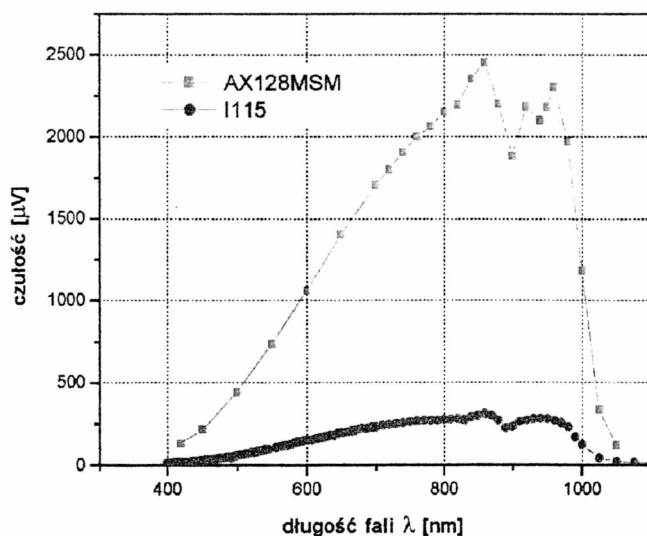
Na rys.7.23. pokazano wyniki pomiarów widmowych detektorów typu PIN. Strukturę oznaczoną I114 wykonano na podłożu GaAs bez zwierciadła Bragga. Strukturę oznaczoną AX128PIN osadzono na podłożu GaAs ze zwierciadłem Bragga. Czułość detektora PIN RCE jest około pięć razy większa niż detektora bez zwierciadła Bragga. Czułość optyczna tych detektorów była równa 0,3A/W. Duża



Rys. 7.23. Porównanie charakterystyk spektralnych detektorów PIN i RCE PIN oraz widmo odbicia dolnego zwierciadła Bragga struktury RCE PIN.

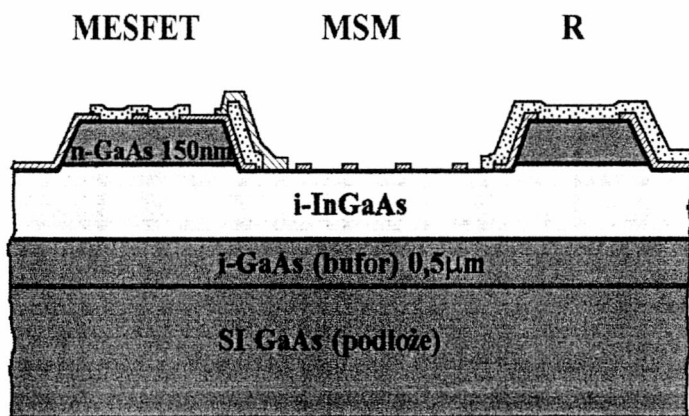
szerokość widma spowodowana była brakiem zgodności długości wnęki rezonansowej z długością projektowaną (brak procesu trawienia powierzchni – dostrajania), co jest niezbędne do otrzymania charakterystyki odpowiedzi o szerokości połówkowej na poziomie pojedynczych nanometrów. Na wykres naniesiono charakterystykę odbiciową samego reflektora Bragga. Dla długości $\lambda_{\text{char}}=890\text{nm}$ uzyskano znaczne zwiększenie czułości detektora. W zakresie długofalowej części charakterystyki obserwuje się podbicie, które można tłumaczyć gorszymi od wymaganych parametrami zwierciadła Bragga. Zwierciadło Bragga wykonane z AlAs/GaAs składało się z pięciu dwuwarstw i charakteryzowało się dużym odbiciem dla długości promieniowania większej od 970nm. Analizując wzmocnienie mocy optycznej i wydajność kwantową takiej konstrukcji wnęki i charakterystyki zwierciadła należało oczekiwać, że kolejne rezonanse będą występowały bardzo blisko siebie i tzw. współczynnik FSR (Free Spectral Range) będzie stosunkowo mały. Stąd w dalszych pracach, dotyczących optymalizacji konstrukcji detektora RCE PIN, szczególną uwagę należy zwrócić na optymalizację parametrów zwierciadła i iloczynu $\alpha \cdot d$ (α – współczynnik absorpcji i d – grubość obszaru czynnego).

Na rys.7.24. pokazano porównanie charakterystyk detektorów MSM (I115) i RCE MSM (AX128MSM). Czułość detektora RCE MSM jest ponad rząd większa niż detektora nie zawierającego zwierciadła Bragga. Czułość optyczna detektorów była równa 0,35A/W [93]. Podobnie jak w przypadku detektorów RCE PIN, grubość wnęki rezonansowej detektorów RCE MSM nie była idealnie dopasowana do długości detekowanej fali (brak procesu dostrajania).



Rys. 7.24. Porównanie charakterystyk spektralnych detektorów MSM i MSM RCE.

W celu oceny przydatności opracowanej technologii struktur InGaAs–GaAs w technice scalania (np. do wytwarzania układów MOMIC) wykonano na podłożu GaAs zintegrowany fotoodbiornik z detektorem typu MSM i wzmacniaczem mikrofalowym [94]. Na rys.7.25. pokazano schemat struktury MOMIC z wbudowanym fotodetektorem z warstwą aktywną $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ [95].

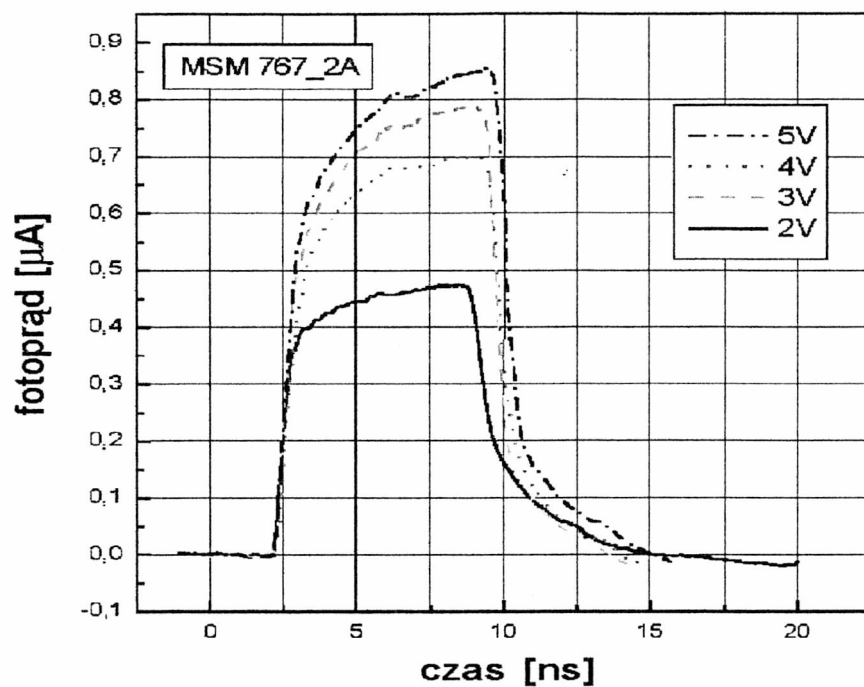


Rys. 7.25. Schemat struktury MOMIC z detektorem MSM z warstwą aktywną $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$.

Zmierzono charakterystyki impulsowe fotodetektora. Jako źródło światła zastosowano diodę laserową HFE4080 ($\lambda=840\text{nm}$, 1mW mocy optycznej), którą sterowano generatorem impulsów nanosekundowych (AVO– 9F– C – czas narostu impulsu $>200\text{ps}$). Sygnał rejestrowano za pomocą oscyloskopu o maksymalnej częstotliwości 4GHz. Na rys.7.26. pokazano odpowiedzi impulsowe detektora MSM przy różnych napięciach zasilania. Na Uniwersytecie Technicznym w Bratysławie zbadano charakterystyki przenoszenia wykonanego fotoodbiornika. Stwierdzono, że w zakresie częstotliwości do 4GHz wzmocnienie jest praktycznie stałe. Można więc twierdzić, że częstotliwość graniczna opracowanego układu jest znacznie większa od 4GHz.

Wnioski.

Na podstawie analizy charakterystyk wyjściowych modeli przyrządów przyrządowych można stwierdzić, że prawidłowo określono parametry technologiczne wytwarzania heterostruktur InGaAs–GaAs na podłożu arsenkowogalowym oraz, że opracowany algorytm wytwarzania i wyznaczone zależności (korelacja charakterystyk wyjściowych z parametrami procesów epitaksjalnych) z powodzeniem zastosowano w modelowaniu i projektowaniu technologii wykonania modeli przyrządów zawierających m. in. obszary niskowymiarowe.



Rys. 7.26. Odpowiedzi detektora MSM z warstwą aktywną $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ dla różnych napięć polaryzacji.

ROZDZIAŁ VIII

Podsumowanie. Wnioski końcowe.

Podsumowanie.

Prezentowana przez autora praca jest rozwinięciem badań kinetyki wzrostu niskowymiarowych warstw i heterostruktur $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$. Przedstawiono analizę danych literaturowych zwracając szczególną uwagę na ograniczenia tej technologii wynikające z silnego niedopasowania parametru sieciowego InGaAs i GaAs . Wzrost tego niedopasowania wraz ze zwiększaniem zawartości In wpływa niekorzystnie na jakość strukturalną wytworzonych warstw i na wartość występujących w nich naprężeń. Dane literaturowe umożliwiły opracowanie wstępnego algorytmu wytwarzania heterostruktur. Natomiast w pracy przedstawiono wyniki badań własnych dotyczących kinetyki wzrostu heterostruktur i struktur niskowymiarowych. W wyniku tych badań osiągnięto następujące cele:

- zbadano korelację między parametrami wzrostu i właściwościami wytwarzanych heterostruktur $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$,
- określono optymalne parametry technologiczne wzrostu heterostruktur $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$,
- wyznaczono podstawowe krzywe kalibracyjne dla wzrostu warstw $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ z kontrolą składu w zakresie od 0 do 20%,
- określono optymalny zakres parametrów wzrostu jedno- i wielokrotnych studni kwantowych z bardzo dobrymi granicami rozdziału i kontrolą grubości studni w zakresie od 6 do 30ML, które spełniają wymagania narzucone obszarom czynnym m. in. w półprzewodnikowych źródłach światła,
- wykonano i przetestowano strukturę diody LED z pięciokrotną studnią kwantową jako obszarem czynnym. Przeprowadzone badania potwierdziły wysoką jakość strukturalną MQW i stabilność obszaru czynnego diody przy obciążeniu stałoprądowym nie większym niż 500mA,
- określono wpływ grubości warstwy i zawartości In na stopień naprężeń występujących w heterostrukturach $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$. Opracowano metodę pomiaru stopnia relaksacji naprężeń za pomocą spektroskopii fotoodbiciowej,
- wykonano struktury testowe detektorów MSM i PIN pracujące przy różnych długościach charakterystycznych. M. in. wykonano detektory z wewnętrznym

optycznym wzmocnieniem (PIN RCE i MSM RCE) o podwyższonej czułości i selektywności. Uzyskano czułość ponad rząd większą od czułości detektorów bez wnęki rezonansowej oraz selektywność widmową czułości na poziomie 50nm. Opracowaną technologię zastosowano do wytworzenia struktury epitaksjalnej (podłoże aktywne) spełniającej wymagania konstrukcji scalonego fotoodbiornika. Zintegrowany monolitycznie fotoodbiornik zbudowany z fotodetektora MSM i jednostopniowego wzmacniacza mikrofalowego z tranzystorem GaAs MESFET ma charakterystykę przenoszenia do częstotliwości większej od 1GHz ze wzmocnieniem sygnału na poziomie 15dB.

Wnioski końcowe.

Wyniki badań kinetyki wzrostu heterostruktur i struktur niskowymiarowych $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$, w tym także jednokrotnych i wielokrotnych studni kwantowych, oraz charakteryzacja modeli przyrządów metodami: HRD, PL, PR, CV, E-CV, PVS i pomiary w zakresie mikrofalowym upoważniają autora do twierdzenia, że podstawowy cel pracy:

Zbadanie kinetyki wzrostu heterostruktur $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$, w tym wielokrotnych studni kwantowych oraz określenie korelacji pomiędzy parametrami procesu MOVPE a właściwościami otrzymanych warstw.

został osiągnięty.

W szczególności należy stwierdzić, że opracowana technologia heterostruktur $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ zapewnia:

- jednorodność składu i grubości na podłożu 2 cale nie gorszą niż 2%,
- kontrolowany wzrost niskowymiarowych warstw na poziomie pojedynczych warstw atomowych z zawartością InAs w stopie trójskładnikowym w zakresie od 0 do 20%,
- wzrost heterostruktur o wysokiej jakości strukturalnej z gładkimi międzypowierzchniami.

Opracowana technologia podłoży aktywnych, z zastosowaniem heterostruktur $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$, spełnia wymagania konstrukcji zaawansowanych struktur przyrządowych mikroelektronicznych i optoelektronicznych (źródła światła, detektory MSM, PIN, w tym z wewnętrznym rezonansem optycznym) oraz układów scalonych (układy typu MOMIC).

Wytworzenie fotoodbiornika w technice scalonej pracującego w zakresie częstotliwości większej od 1GHz oraz detektorów o zwiększonej czułości i selektywności potwierdzają, że autor pracy osiągnął również założone cele praktyczne.

Bibliografia

- [1] Shahid M.A. i in., Phys. Rev. Lett., 58, 1987, s.2567,
- [2] Kuan T.S. i in., Appl. Phys. Lett., 51, 1987, s.51,
- [3] Ueda O. i in., Appl. Phys. Lett., 58, 1991, s.705,
- [4] Adachi S.J., *Physical Properties of III–V Semiconducting Compounds: InP, InAs, GaAs, GaP, InGaAs, and InGaAsP*, Wiley–Interscience, New York, 1992,
- [5] Adachi S.J., J. Appl. Phys., 61, 1987, s.4869,
- [6] Adachi S.J., J. Appl. Phys., 53, 1982, s.8775,
- [7] Marciniak W., *Przrządy półprzewodnikowe i układy scalone*, WN–T, Warszawa, 1979,
- [8] Madelung O., *Semiconductors – Group IV Elements and III–V Compounds*, Springer–Verlag, Berlin, 1987,
- [9] Razeghi M., *The MOCVD Challenge Volume 1: Survey of GaInAsP–InP for Photonic and Electronic Applications*, IOP Publishing Ltd, Bristol and Philadelphia, 1989, s.3,
- [10] Matthews J.W. i in., J. Appl. Phys., 41, 1970, s.3800,
- [11] Matthews J.W., *Epitaxial Growth* vol B, 1975,
- [12] Krishnamoorthy V. i in., Appl. Phys. Lett., 58, 1991, s.2000,
- [13] Breen K., J. Electron. Mater., 21, 1992, s.409,
- [14] Herman M.A., Sitter H., *Molecular Beam Epitaxy*, Springer–Verlag, 1989,
- [15] Chand N., J. Cryst. Growth, 97, 1989, s.415,
- [16] Chand N. i in., J. Cryst. Growth, 104, 1990, s.485,
- [17] Cheng K.Y. i in., J. Appl. Phys., 52, 1981, s.1015,
- [18] Cheng K.Y. i in., J. Appl. Phys., 52, 1981, s.6328,
- [19] Cheng K.Y., Cho A.Y., J. Appl. Phys., 53, 1982, s.4411,
- [20] Alavi K. i in., Appl. Phys. Lett., 42, 1983, s.254,
- [21] Elman B. i in., J. Appl. Phys., 70, 1991, s.2634,
- [22] Panish M.B., Temkin H., *Gas Source Molecular Beam Epitaxy*, Springer–Verlag, 1993,
- [23] Chand N., Karlicek Jr. R.F., *Properties of Lattice–Matched and Strained Indium Gallium Arsenide – Epitaxy of InGaAs*, INSPEC, Londyn, 1993, s.221,
- [24] Stillman G.E. i in., IEEE Trans. Electron. Devices, 29, 1982, s.1355,
- [25] Brain M.C. i in., Electron. Lett., 20, 1984, s.894,
- [26] Byrne E.K., *Indium Phosphide and Related Materials: Processing, Technology and Devices*, Ed. A. Katz, Artech House, Norwood, 1992, s.155,
- [27] Zilko J.L., i in., J. Cryst. Growth, 124, 1992, s.112,
- [28] Razeghi M., *The MOCVD Challenge Volume 1: A survey of GaInAsP–InP for*

- Photonic and Electronic Applications*, IOP Publishing Ltd, Bristol and Philadelphia, 1989, s.205,
- [29] Kressel H., *Semiconductor Devices for Optical Communication*, Berlin, 1980,
 - [30] Bugajski M., *Low Dimensional Semiconductor Structures*, OWPW, Warszawa, 1997,
 - [31] Hirotsu M. i in., *J. Crystal Growth*, 170, 1997, s.390,
 - [32] Lee J.H. i in., *Electron. Lett.*, 33, 1997, s.1179,
 - [33] Tan G-L. i in., *IEEE J. Quantum Electron.*, 33, 1997, s.1384,
 - [34] Temkin H. i in., *Appl. Phys. Lett.*, 50, 1987, s.1773,
 - [35] Moon R.L., *J. Crystal Growth*, 170, 1997, s.1,
 - [36] Mroziwicz B, Bugajski M., Nakwaski W., *Lasery Półprzewodnikowe*, PWN, Warszawa, 1985,
 - [37] Siuzdek J., *Wstęp do współczesnej telekomunikacji światłowodowej*, WKŁ, Warszawa, 1997,
 - [38] Prosyk K. i in., *IEEE J. Quantum Electron.*, 33, 1997, s.1360,
 - [39] Bouchoule S. i in., *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.*, 3, 1997, s.330,
 - [40] Temkin H. i in., *Appl. Phys. Lett.*, 56, 1990, s.1222,
 - [41] Nichols D.T. i in., *IEEE Quantum Electron.*, 8, 1992, s.1239,
 - [42] Dutta N.K., i in., *Electron. Lett.*, 26, 1990, s.1816,
 - [43] Dutta N.K., *Properties of Lattice-Matched and Strained Indium Gallium Arsenide – InGaAs DH and quantum well lasers*, INSPEC, Londyn, 1993, s.279,
 - [44] Watanabe H. i in., *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.*, 3, 1997, s.659,
 - [45] Bhattacharya P. i in., *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 10, 1998, s.778,
 - [46] Suematsu Y. i in., *Lightwave Technol.*, 1, 1983, s.162,
 - [47] Itaya Y. i in., *Electron. Lett.*, 18, 1982, s.1006,
 - [48] Westbrook L.D. i in., *Electron. Lett.*, 20, 1984, s.225,
 - [49] Silvestre L. i in., *J. Crystal Growth*, 170, 1997, s.639,
 - [50] Koch T.L., i in., *IEEE J. Lightwave Tech.*, 8, 1990, s.274,
 - [51] Poulain P., de Cremoux B., *Japan. J. Appl. Phys.*, 19, 1980, s.189,
 - [52] Kazmierski K. i in., *Japan. J. Appl. Phys.*, 23, 1984, s.628,
 - [53] Cinguino P. i in., *Appl. Phys. Lett.*, 50, 1987, s.1515,
 - [54] Chai Y.G., Yeats R., *IEEE Electron. Device Lett.*, 4, 1983, s.252,
 - [55] Razeghi M., *The MOCVD Challenge Volume 1: A survey of GaInAsP-InP for Photonic and Electronic Applications*, IOP Publishing Ltd, Bristol and Philadelphia, 1989, s.63,

- [56] Cheng C.L. i in., IEEE Electron. Device. Lett., 5, 1984, s.169,
- [57] O'Conner P. i in., IEEE Electron. Device Lett., 3, 1982, s.64,
- [58] Onho H. i in., IEEE Electron. Device. Lett., 1, 1980, s.154,
- [59] Bandy S. i in., Appl. Phys. Lett. 38, 1981, s.817,
- [60] Vescan L. i in., Electron. Device Lett., 18, 1982, s.533,
- [61] Razeghi M. i in., *Gallium Arsenide and Related Compounds*, 1987, Inst. Phys. Conf. Ser. 91, s.781,
- [62] Vilcot J.P. i in., Physica B, 129, 1985, s.488,
- [63] Instrukcja PC firmy Bronkhorst,
- [64] Instrukcja generatora azotu firmy Atlas Copco,
- [65] Instrukcja miernika zawartości tlenu w gazach obojętnych firmy Servomex,
- [66] Instrukcja miernika zawartości pary wodnej w gazach firmy Shaw,
- [67] Instrukcja generatora wodoru firmy Johnson Matthey,
- [68] Katalog gazów firmy Alphagaz,
- [69] Katalog gazów firmy Messer,
- [70] Instrukcja obsługi wagi elektronicznej firmy SARTORIUS,
- [71] Tłaczała M., Kozłowski J., **Radziewicz D.**, Korbutowicz R., Heterostructures Epitaxy and Devices –HEAD'97, s.119,
- [72] Cardona M., *Modulation Spectroscopy*, Academic Press, Nowy York, Londyn, 1969,
- [73] Aspnes D.E., Handbook on Semiconductors, 2, [wyd.] M. Balkanski, 1980, s.109,
- [74] Seraphin B.O., Bottka N., Phys. Rev., 145, 1966, s.628,
- [75] Pollak F.H., Glembocki O.J., Proc. SPIE, 946, 1988, s.2,
- [76] Pollak F.H., Handbook on Semiconductors, [wyd.] M. Balkanski, 2, 1994, s.527,
- [77] Aspnes D.E., Surf. Sci., 37, 1973, s.418,
- [78] Aspnes D.E., Studna A.A., Phys. Rev. B, 7, 1973, s.4605,
- [79] Sęk G., Talik J., Misiewicz J., **Radziewicz D.**, Tłaczała M., Panek M., Korbutowicz R., Electron Technol., 30, 4, 1997, s.366,
- [80] Sęk G., Misiewicz J., **Radziewicz D.**, Tłaczała M., Panek M., Korbutowicz R., Vacuum, 50, 1998, s.219,
- [81] Sęk G., Misiewicz J., **Radziewicz D.**, Tłaczała M., Panek M., Korbutowicz R., Vacuum, 50, 1998, s.199,
- [82] Sęk G., Ciorga M., Misiewicz J., **Radziewicz D.**, Korbutowicz R., Panek M., Tłaczała M., Adv. Mater. Opt. Electrom., 7, 1998, s.307,
- [83] Lautenschlager P. i in., Phys. Rev. B, 35, 1987, s.9174,
- [84] Hang Z. i in., Phys. Rev. B, 44, 1991, s.10546,
- [85] Chen J.H. i in., Semicond. Sci. Technol., 8, 1993, s.1420,

- [86] Chi W.S. i in., Jpn. J. Appl. Phys., 33, 1994, s.966,
- [87] Sęk G., Misiewicz J., **Radziewicz D.**, Korbutowicz R., Tłaczała M., Optica Applicata, 29, 1999, s.301,
- [88] Lambkin J.D. i in., Appl. Phys. Lett., 57, 1990, s.1986,
- [89] Leymarie J. i in., Phys. Rev. B, 51, 1995, s.13374,
- [90] Instrukcja sondy elektrochemicznej CV PN4300 firmy Bio–Rad,
- [91] **Radziewicz D.**, Ściana B., Zborowska–Lindert I., Sęk G., Misiewicz J., Tłaczała M., Proc. 22nd Intern. Spring Seminar on Electronics Technology, Freital–Dresden, Germany, 1999, s.255,
- [92] Sęk G., Ciorga M., Bryja L., Misiewicz J., **Radziewicz D.**, Ściana B., Tłaczała M., Optica Applicata, 30, 2000, s.183,
- [93] Wang D.P. i in., J. Appl. Phys., 78, 1995, s.2117,
- [94] Instrukcja analizatora widma AQ–6315B firmy ANDO,
- [95] Boratyński B., **Radziewicz D.**, Patela S., Zborowska–Lindert I., Szreter M., Conf. Proc. ISSE'99, s.252,
- [96] Boratyński B., **Radziewicz D.**, Korbutowicz R., Zborowska–Lindert I., Proc. Heterostructure Epitaxy and Devices –HEAD'97, s.243,
- [97] Tłaczała M., Proc. Intern. Confer. Solid State Crystals ICSS'2000, Zakopane, 2000, w druku,
- [98] Midwinter Y.E., Guo Y.L., Optoelektronika i technika światłowodowa, WKŁ, Warszawa 1995.

DODATEK A

Informacja na temat wykorzystania części pracy w publikacjach.

Wyniki badań przedstawione w rozprawie doktorskiej zostały częściowo wykorzystane w poniższych publikacjach:

- 1) Sęk Grzegorz, Talik S, Misiewicz Jan, **Radziewicz Damian**, Tłaczała Marek, Panek Marek, Korbutowicz Ryszard: Strained and relaxed InGaAs on GaAs investigated by photorefectance. Fotoodbiciowe badania naprężonych i zrelaksowanych warstw InGaAs na GaAs. Electron Technol. 1997 vol. 30 nr 4 s. 366–369,
- 2) **Radziewicz Damian**, Tłaczała Marek, Kozłowski Janusz, Paszkiewicz Bogdan, Panek Marek, Korbutowicz Ryszard, Misiewicz Jan, Bryja Leszek, Ciorga Mariusz, Sęk Grzegorz, Starowiejski Kazimierz M: Technologia struktur niskowymiarowych InGaAs–GaAs/GaAs. W: Technologia elektronowa. VI Konferencja Naukowa ELTE 97. Katedra Elektroniki AGH w Krakowie. Krynica, 6.05.–9.05.1997. T. 2. Kraków: AGH 1997 s. 523–526,
- 3) Misiewicz Jan, Ciorga Mariusz, Sęk Grzegorz, Bryja Leszek, **Radziewicz Damian**, Korbutowicz Ryszard, Panek Marek, Tłaczała Marek: Photorefectance and photoluminescence of InGaAs/GaAs structures. Fotoodbicie i fotoluminescencja struktur InGaAs/GaAs. W: Solid state crystals in optoelectronics and semiconductor technology. Eds Antoni Rogalski [i in.]. Institute of Applied Physics Military University of Technology Warsaw (Poland). Zakopane, Poland, 7–11 October 1996. Bellingham, Wash.: SPIE – The International Society for Optical Engineering 1997 s. 125–128, (SPIE Proceedings Series, ISSN 0277–786X; vol. 3179),
- 4) Sęk Grzegorz, Misiewicz Jan, **Radziewicz Damian**, Tłaczała Marek, Panek Marek, Korbutowicz Ryszard: Study of the nature of light hole excitonic transitions in InGaAs/GaAs quantum well. Badania przejść ekscytowanych związanych z lekkimi dziurami w studni kwantowej InGaAs/GaAs. Vacuum 1998 vol. 50 nr 1/2 s. 199–201, Referat z 6th International Workshop on Electronic Properties of Metal/Non Metal Microsystems. Prague, 8–12 September 1997,
- 5) **Radziewicz Damian**, Ściana Beata, Tłaczała Marek, Korbutowicz Ryszard, Paszkiewicz Regina, Kozłowski Janusz, Panek Marek, Misiewicz Jan, Bryja Leszek, Ciorga Mariusz, Sęk Grzegorz: Properties of $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}/\text{GaAs}$ multilayered system. Właściwości struktur wielowarstwowych związków

- $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}/\text{GaAs}$. Mol. Phys. Rep. 1998 vol. 21 s. 113–117, Referat z National Symposium on Crystalline Microstructures. Poznań, 2–4 July 1997,
- 6) Sęk Grzegorz, Misiewicz Jan, **Radziewicz Damian**, Tłaczała Marek, Panek Marek, Korbutowicz Ryszard: Critical layer thickness of InGaAs on GaAs examined by photorefectance spectroscopy. Badania grubości krytycznej InGaAs na GaAs za pomocą spektroskopii fotoodbiciowej. Vacuum 1998 vol. 50 nr 1/2 s. 219–221, Referat z 6th International Workshop on Electronic Properties of Metal/Non Metal Microsystems. Prague, 8–12 September 1997,
 - 7) Sęk Grzegorz, Ciorga Mariusz, Misiewicz Jan, **Radziewicz Damian**, Korbutowicz Ryszard, Panek Marek, Tłaczała Marek: Optical investigations of strained InGaAs quantum wells. Optyczne badania naprężonych studni kwantowych InGaAs. Adv. Mater. Opt. Electron. 1998 vol. 7 nr 6 s. 307–310,
 - 8) Tłaczała Marek, Kozłowski Janusz, **Radziewicz Damian**, Korbutowicz Ryszard: Critical thickness investigation of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ by X-ray measurements. Badanie krytycznej grubości warstw $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ metodą pomiarów rentgenowskich. W: Heterostructure epitaxy and devices – HEAD '97. [Proceedings of the NATO Advances Research Workshop on Heterostructure Epitaxy and Devices – HEAD '97]. Ed. by Peter Kordos and Jozef Novak, [Smolenice, Slovakia, October 12–16, 1997]. Dordrecht [i in.]: Kluwer Academic Publ., cop. 1998 s. 119–122, (NATO ASI Series 3, High Technology; vol. 48),
 - 9) Boratyński Bogusław, **Radziewicz Damian**, Korbutowicz Ryszard, Zborowska–Lindert Iwona: InGaAs on GaAs structures for photodetector applications. Struktury InGaAs osadzone na podłożu GaAs przeznaczone do konstrukcji fotodetektorów. W: Heterostructure epitaxy and devices – HEAD '97. [Proceedings of the NATO Advances Research Workshop on Heterostructure Epitaxy and Devices – HEAD '97]. Ed. by Peter Kordos and Jozef Novak. [Smolenice, Slovakia, October 12–16, 1997]. Dordrecht [i in.]: Kluwer Academic Publ., cop. 1998 s. 243–245, (NATO ASI Series 3, High Technology; vol. 48),
 - 10) Wielichowski Marcin, **Radziewicz Damian**, Patela Sergiusz, Licznarski Benedykt, Ciorga Mariusz, Sęk Grzegorz, Misiewicz Jan: Światłowód planarny ze studniami kwantowymi w arsenku galu. W: Światłowody i ich zastosowania. VII Konferencja. Referaty i komunikaty. Pracownia Technologii Światłowodów UMCS, Katedra Elektroniki PLub. Krasnobród, 14–16 października 1999. T. 1. Lublin: Instytut Zastosowań Techniki 1999 s. 210–214,
 - 11) **Radziewicz Damian**, Ściana Beata, Zborowska–Lindert Iwona, Sęk Grzegorz,

- Misiewicz Jan, Tłaczała Marek: InGaAs/GaAs MQW light-emitted-diode. Dioda elektroluminiscencyjna InGaAs/GaAs MQW. W: 22nd International Spring Seminar on Electronics Technology 1999. Hrsg. Wilfried Sauer, Klaus-Jürgen Wolter. Institut fuer Elektronik-Technologie [i in. Freital-Dresden, Germany, May 18th-20th 1999]. Templin/Uckermark: Detert 1999 s. 255-257,
- 12) Boratyński Bogusław, **Radziewicz Damian**, Patela Sergiusz, Zborowska-Lindert Iwona, Szreter Mirosław: Performance comparison of MSM and PIN InGaAs photodetectors. Charakterystyka porównawcza fotodetektorów z InGaAs typu MSM i PIN. W: 22nd International Spring Seminar on Electronics Technology 1999. Hrsg. Wilfried Sauer, Klaus-Jürgen Wolter. Institut fuer Elektronik-Technologie [i in. Freital-Dresden, Germany, May 18th-20th 1999]. Templin/Uckermark: Detert 1999 s. 252-254,
 - 13) Sęk Grzegorz, Misiewicz Jan, **Radziewicz Damian**, Korbutowicz Ryszard, Tłaczała Marek: Photoreflectance spectra of MOVPE-grown $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ MQW - the temperature dependence. Widma fotoodbiciowe struktur $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ otrzymywanych metodą MOVPE - zależność temperaturowa. Opt. Appl. 1999 vol. 29 nr 3 s. 301-308,
 - 14) Boratyński Bogusław, Paszkiewicz Bogdan, **Radziewicz Damian**, Ściana Beata, Tłaczała Marek, Zborowska-Lindert Iwona: Zintegrowany fotoodbiornik na zakres $\lambda=870\text{nm}$. W: Technologia elektronowa. ELTE 2000. VII Konferencja naukowa. Materiały konferencyjne. Polanica Zdrój, 18-22 września 2000. T. 1. Wrocław: Instytut Techniki Mikrosystemów PWroc. [2000] s. 578-581,
 - 15) Sęk Grzegorz, Ciorga Mariusz, Bryja Leszek, Misiewicz Jan, **Radziewicz Damian**, Ściana Beata, Tłaczała Marek: Optical characterisation of strained-layer $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ MQW LED grown by MOVPE. Badania optyczne naprężonych struktur $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ MQW LED otrzymanych metodą MOVPE. Opt. Appl. 2000 vol. 30 nr 1 s. 183-188,
 - 16) Zborowska-Lindert Iwona, **Radziewicz Damian**, Boratyński Bogusław, Ściana Beata, Patela Sergiusz, Tłaczała Marek: Investigation of InGaAs/GaAs photodetectors with AlAs/GaAs nanolayers. Badanie fotodetektorów na bazie InGaAs/GaAs wykorzystujących nanowarstwy AlAs/GaAs. W: The Third International EuroConference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems. ASDAM 2000. Conference proceedings. Ed. by Jozef Osvald [i in.]. Smolenice, Slovakia, October 16-18, 2000. [Piscataway, NJ: IEEE], cop. 2000 s. 115-118.