

# CHARAKTERYZACJA WARSTW EPITAKSJALNYCH Z TELLURKU KADMOWO-RTEŃCIOWEGO ( $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ) ZA POMOCĄ WYKONANYCH FOTODIOD

Aleksandra Królicka

Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, ul. Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa,  
e-mail - [aleksandra\\_krolicka@wp.pl](mailto:aleksandra_krolicka@wp.pl)

Celem pracy było opanowanie metody szybkiej charakteryzacji fotodiod z tellurku kadmowo-rtęciowego -  $\text{HgCdTe}$  - otrzymywanych metodą MOCVD (*Metal Organic Chemical Vapor Deposition*) tzn. techniką osadzania warstw na powierzchni materiałów poprzez stosowanie związków metaloorganicznych w formie gazowej oraz analiza tej metody. W pierwszej kolejności otrzymane warstwy epitaksjalne poddawano procesowi technologicznemu i w ten sposób uzyskiwano gotowe fotodiody. Dokonano też pomiarów czasu trwania poszczególnych etapów procesu technologicznego. Uzyskane detektory poddawano następnie pomiarom w celu wyznaczenia ich charakterystyk prądowo-napięciowych oraz spektralnych. Na podstawie analizy tych charakterystyk oraz z wykonanych obliczeń otrzymano parametry diod, które następnie porównano z parametrami na jakie zaprojektowano

heterostruktury oraz z wartościami literaturowymi. Zarówno w tym przypadku, jak i podczas przeprowadzania procesu technologicznego dążono do jak największego zminimalizowania czasu potrzebnego na wykonanie każdego etapu przy jednoczesnym zachowaniu staranności i dokładności wykonywanych czynności. Istotą postępowania było bowiem jak najszybsze uzyskanie informacji zwrotnej dotyczącej parametrów otrzymanych heterostruktur w celu porównania ich z założeniami wstępnymi i ewentualnego szybkiego skorygowania procesu epitaksji, dążąc tym samym do jego usprawnienia.

**Słowa kluczowe:** epitaksja, MOCVD, detektor podczerwieni, fotodetektor, fotodioda

## Characterization of mercury cadmium telluride ( $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ) epitaxial layers using the manufactured photodiodes

The aim of this study was to master a method for a quick characterization of mercury cadmium telluride ( $\text{HgCdTe}$ ) photodiodes obtained by MOCVD (*Metal Organic Chemical Vapor Deposition*) method, which was achieved. First, the obtained epitaxial layers were subjected to the technological process procedures and thus complete photodiodes were fabricated. The duration of measurements of each process stage was quantified. Detectors were then measured to determine their current-voltage and spectral characteristics. On the basis of the analysis of both these characteristics and calculations, the parameters of diodes were obtained. They were subsequently compared with the parameters of designed target heterostructures and with literature values. Both here and during the process the goal was to minimize as much as possible the time needed to complete each stage, while maintaining diligence and accuracy of the performed operations. The essence was to be provided with rapid feedback concerning the parameters of the obtained heterostructures in order to compare them with the initial assumptions and, if needed to correct next epitaxy processes, aiming at their improvement.

**Key words:** epitaxy, MOCVD, infrared detector, photodetector, photodiode,

### 1. WSTĘP

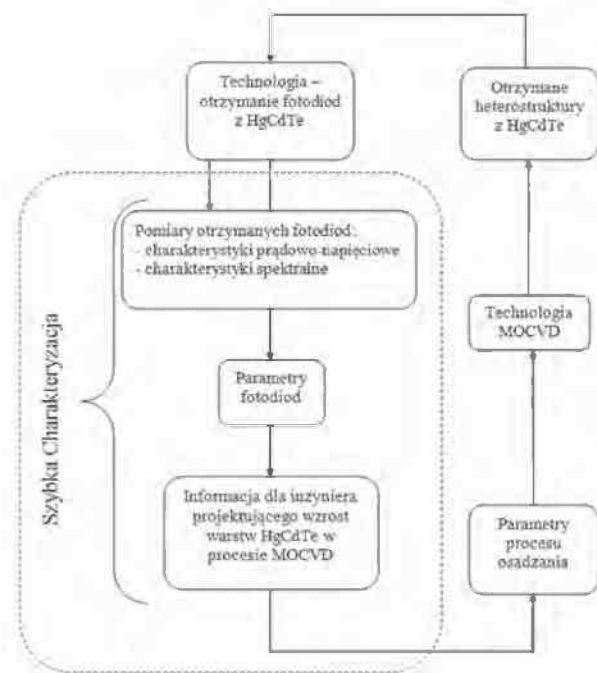
Rozwój detektorów promieniowania podczerwonego opiera się na ciągłym doskonaleniu technologii epitaksjalnych oraz technologii processingu. Postęp nie byłby jednak możliwy bez systematycznej analizy otrzymywanych wyników i wyciągania wniosków z badań oraz wdrażania innowacji w przyszłej działalności. Dużym ułatwieniem i usprawnieniem tych procesów jest zastosowanie metody szybkiej charakteryzacji, ogranicza ona bowiem w znacznym stopniu czas potrzebny na uzyskanie pożądanych parametrów.

Praktyczna realizacja heterostruktur, to proces bardzo złożony, który wymaga opracowania procedur opisywanych dziesiątkami parametrów i charakterystyk. Każda zmiana jednego parametru wzrostu pociąga za sobą konieczność zmiany wielu innych. Powoduje to, że dopracowanie technologii jest skomplikowane i wymaga niesłychanie dużego nakładu pracy.

Epitaksja jest krytycznym etapem produkcji heterostruktur. Jest to jednak dopiero początek procesu wytwarzania detektorów. Proces technologiczny wymaga kilkudziesięciu dalszych operacji takich jak: trawienie, nanoszenie warstw pasywacyjnych i kontaktowych, cięcie płytek na chipy, czy też wytwarzanie mikrosoczewek immersyjnych monolitycznie

zintegrowanych ze strukturą detektora. Po przejściu procesu technologicznego nowo powstały detektor poddawany jest wszechstronnej charakteryzacji. Dotyczy to zarówno struktur testowych, jak i gotowych przyrządów. Wykonywane są więc pomiary charakterystyk impedancyjnych, widmowych, szumowych i ich zależności od temperatury i innych czynników. Wszystkie te zadania sprawiają, że czas potrzebny na wytworzenie diody w wielkoskalowym procesie produkcyjnym wynosi przeciętnie od tygodnia do 2 miesięcy, zatem bardzo długo.

„Szybka charakteryzacja” w bardziej szczegółowym ujęciu oznacza skrócone procedury, zmierzające do minimalizacji czasu, pozwalające na możliwie szybki odczyt parametrów warstwy heterostruktur, których odzwierciedleniem są parametry diody. W celu lepszego zobrazowania istoty szybkiej charakteryzacji całkowity tok postępowania można przedstawić za pomocą schematu blokowego, przedstawionego na Rys. 1.

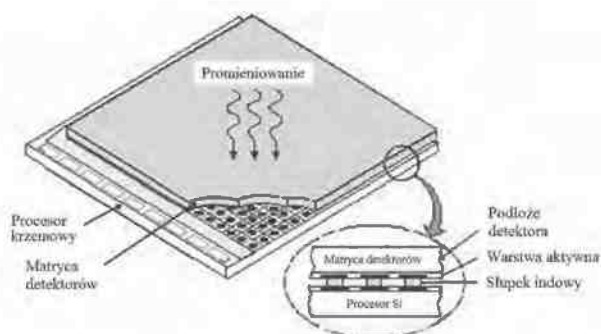


**Rys. 1.** Schemat blokowy pełnego procesu produkcji fotodiody z  $\text{HgCdTe}$ .

**Fig. 1.** A block diagram of a full manufacturing process of  $\text{HgCdTe}$  photodiodes.

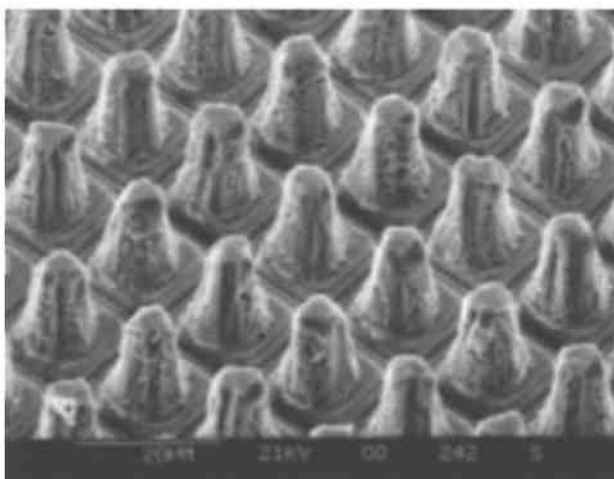
Spośród wielu typów detektorów fotonowych fotodiody cieszą się obecnie największym zainteresowaniem. Dzieje się tak ze względu na większą szybkość działania w porównaniu z innymi detektorami oraz brak konieczności dodatkowego zasilania stałoprądowego. Fakt, iż fotodiody same stanowią źródło prądu znacznie upraszcza elektronikę konieczną do sterowania pracą detektora. Zmniejsza się również wydzielanie ciepła, co umożliwi konstrukcję gęsto

upakowanych dwuwymiarowych matryc zawierających tysiące elementów (Rys. 2 - 3) [1 - 2].



**Rys. 2.** Łączenie hybrydowe dwuwymiarowej matrycy detektorów z procesorem krzemowym [1].

**Fig. 2.** Hybrid combination of a two-dimensional matrix of detectors with a silicon processor [1].



**Rys. 3.** Matryca fotodiod z HgCdTe ze słupkami indywu (indium - bumps), dwa słupki indywu przypadające na jeden piksel umożliwiają niezależne połączenie procesora odczytu z dwiema przeciwnie ustawionymi fotodiodami [2].

**Fig. 3.** Matrix of HgCdTe photodiodes with indium - bumps, two indium bumps per pixel allow an independent connection of the read processor with two antiparallel photodiodes [2].

Możliwości zastosowań detektorów promieniowania podczerwonego są bardzo duże. Obecnie urządzenia te są szeroko stosowane m.in.: w termowizji, w technice wojskowej (w urządzeniach do samonaprowadzania pocisków raketowych i artyleryjskich, bombach lotniczych, do obserwacji terenu w warunkach złej widoczności, do wykrywania skażeń). Obserwuje się również intensywny rozwój zastosowań cywilnych w takich dziedzinach, jak: pirometria, termografia, defektoskopia, czy spektrografia [3]. Aby wykorzystać ich potencjał jak najefektywniej w ostatnich latach prowadzone są

liczne prace mające na celu poprawę parametrów fotoelektrycznych tych detektorów.

## 2. DETEKTORY FOTOWOLTAICZNE - FIZYCZNE PODSTAWY DZIAŁANIA

Podstawą działania fotodiody ze złączem p-n jest zjawisko fotowoltaiczne. Na diodę pada wiązka promieniowania elektromagnetycznego o energii większej od przerwy wzbronionej  $E_g$ . W obszarze ładunku przestrzennego złącza i (lub) w materiale przylegającym do tego obszaru po obu stronach złącza następuje absorpcja fotonów padającego promieniowania. W wyniku tej absorpcji generowane są pary elektron - dziura. Pod wpływem pola elektrycznego w złączu następuje separacja wygenerowanych nośników. Szczególną rolę w tym zjawisku spełniają nośniki mniejszościowe, które przemieszczają się w kierunku złącza. Gdy złącze jest rozwarne, to na jego krańcach pojawia się różnica potencjałów. Natomiast gdy mamy do czynienia z obwodem zamkniętym, to przez układ płynie fotoprąd. Po oświetleniu złącza można więc uzyskać źródło energii elektrycznej (czego najlepszym przykładem są baterie słoneczne). Absorpcja światła nie wpływa natomiast na zmianę koncentracji nośników większościowych. Dzieje się tak, ponieważ ilość nośników generowanych światłem jest o kilka rzędów mniejsza od koncentracji równowagowej tych nośników.

Kluczową sprawą jest, aby czas życia generowanego nośnika był wystarczająco długi, tak by zdążył on dotrzeć do warstwy zaporowej powodującej rozdzielanie ładunku. W tym celu nośniki przed rozdzielaniem przez pole nie powinny ulec rekombinacji powierzchniowej. W półprzewodnikach mamy do czynienia z rekombinacją samoistną i domieszkową, zarówno w objętości półprzewodnika, jak i przy powierzchni. W półprzewodnikach z prostą przerwą wzbronioną rekombinacja samoistna jest o wiele większa niż w półprzewodnikach z przerwą skośną. Szybkość tej rekombinacji powinna być jak najmniejsza. Fotony o mniejszych długościach fali (o większej energii) są bardzo silnie absorbowane tuż przy powierzchni półprzewodnika (niezależnie od kierunku padającego promieniowania), ponieważ dla nich współczynnik absorpcji jest bardzo duży. Tak więc pary elektron-dziura generowane przez te fotony powstają głównie w obszarze przypowierzchniowym. W związku z tym liczba nośników, które osiągają złącze i dają swój wkład do fotoprądu jest limitowana rekombinacją powierzchniową.

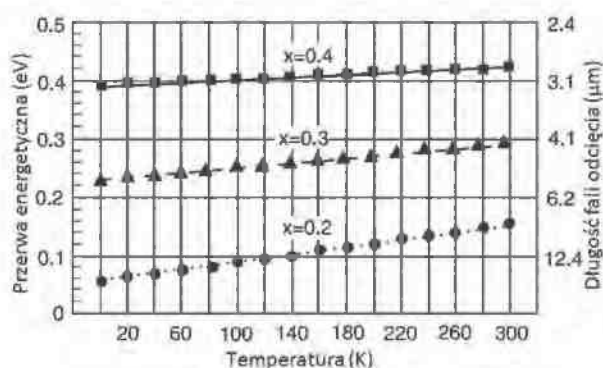
Jednym ze sposobów uniknięcia tego niepożądanego efektu jest oświetlenie diody od strony podłoża (sposób ten był wykorzystywany w prezentowanej pracy). Inny sposób polega na stosowaniu materiału półprzewodnikowego o większej przerwie wzbronionej  $E_g$  w strefach przy powierzchni złącza p-n. Dla fotonów o energii większej od  $E_g$  materiału stosowanego na diodę, ale o energii mniejszej niż przerwa wzbroniona materiału przy powierzchni złącza tenże materiał jest przezroczysty i fotony bez przeszkód docierają do aktywnego obszaru złącza p-n [4 - 6].

### 3. TEORETYCZNA ANALIZA PARAMETRÓW CHARAKTERYZUJĄCYCH DETEKTORY FOTOWOLTAICZNE [3, 7]

#### • Przerwa energetyczna $E_g$

Detekcja promieniowania podczerwonego w HgCdTe rozpoczyna się od pobudzenia elektronu z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa. Minimalna energia, jaką musi posiadać foton równa jest wartości przerwy wzbronionej  $E_g$ . Przerwa wzbroniona w HgCdTe jest funkcją stosunku składu stopu CdTe do składu HgTe i temperatury materiału. Równanie, opisujące tę zależność jest dane wyrażeniem:  $E_g = -0,302 + 1,93x - 0,81x^2 + 0,832x^3 + 5,35(1-2x)10^{-4}T$  gdzie:  $E_g$  - przerwa energetyczna,  $x$  - skład,  $T$  - temperatura.

Rys. 4 ilustruje zależność tego równania dla typowych składów stopu:  $x = 0,2$ ;  $0,3$  i  $0,4$ , które rozciągają się od średnio do długofalowego obszaru widmowego 3 – 14  $\mu\text{m}$ .



**Rys. 4.** Pasmo wzbronione i długość fali odcięcia dla wybranych składów stopu  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  w funkcji temperatury [8].

**Fig. 4.** Band gap and cut off wavelength for the chosen compositions of an  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  alloy as a function of temperature [8].

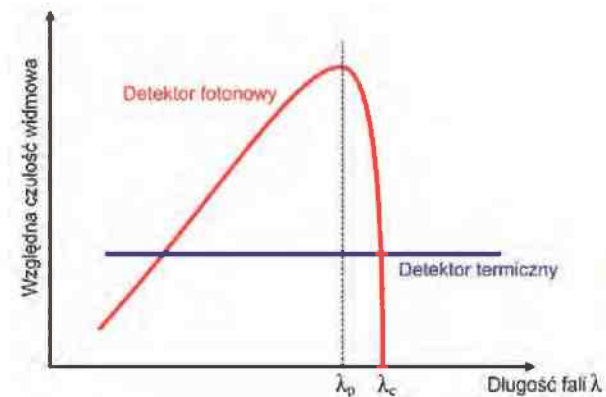
#### • Długość fali odcięcia $\lambda_c$

Występuje ona przy spełnionym warunku:  $h\nu > \Delta/E_g$ , czyli wtedy, gdy w półprzewodniku zachodzi absorpcja podstawowa lub inaczej samoistna. Powoduje ona przejście elektronu ze stanu związanego w stan swobodny, tzn. z pasma podstawowego do pasma przewodnictwa. Jest definiowana jako:  $\lambda_c = hc/E_g$ . Po przeliczeniu jednostek otrzymuje się:

$$\lambda_c [\mu\text{m}] = \frac{1,24}{E_g [\text{eV}]}$$

gdzie:  $h$  – stała Plancka,  $c$  – prędkość światła,  $E_g$  – przerwa energetyczna.

Długość fali odcięcia można również odczytać z wykresu charakterystyk widmowych (Rys. 5), o czym będzie jeszcze mowa w rozdziale o analizie wyników pomiarów.



**Rys. 5.** Ogólny schemat charakterystyki spektralnej diody.  
**Fig. 5.** General scheme of the spectral characteristics of a photodiode.

#### • Iloczyn $R_0A$ złącza p-n

Jest to znormalizowana rezystancja dynamiczna przy zerowej polaryzacji złącza. Wielkość ta jest powszechnie używana w celu określenia parametrów fotodiod. Wyraża się ją wzorem:

$$R_0A = \left( \frac{dJ}{dV} \right)^{-1}_{V=0}$$

gdzie:  $R_0$  - rezystancja przy zerowej polaryzacji złącza,  $A$  - powierzchnia złącza,  $J$  - całkowita gęstość prądu płynącego przez złącze,  $V$  - polaryzacja detektora.

#### • Wydajność kwantowa $\eta$

Wydajność kwantowa jest określana jako stosunek liczby wygenerowanych w detektorze par

elektron - dziura do liczby padających fotonów promieniowania. Wielkość ta określa zatem efektywność oddziaływania fotonów promieniowania z elektronami. Liczy się ją z zależności:

$$\eta = \frac{R_I}{\lambda} \frac{hc}{q} = 1,24 \frac{R}{\lambda},$$

gdzie:  $R_I$  – czułość prądowa,  $q$  – ładunek elementarny [C],  $\lambda$  – długość fali [ $\mu\text{m}$ ],  $R$  – rezystancja.

#### • Czulość prądowa $R_I$

Czulość prądowa detektora definiowana jest jako stosunek wartości skutecznej mocy prądu wyjściowego detektora o częstotliwości podstawowej do wartości skutecznej mocy padającego promieniowania o częstotliwości podstawowej:

$$R_I = \frac{P_{\text{syg}}}{P_{\text{opt}}},$$

gdzie:  $P_{\text{syg}}$  – moc sygnału detektora,  $P_{\text{opt}}$  – moc padającego promieniowania.

#### • Czulość napięciowa $R_V$

Aby otrzymać czulość napięciową, wystarczy pomnożyć czulość prądową  $R_I$  przez rezystancję  $R_0$ :

$$R_V = R_I R_0.$$

#### • Moc równoważna szumowi ( $NEP$ )

Jest to taka wartość skuteczna mocy promieniowania padającego na detektor, która daje na wyjściu sygnał o wartości skutecznej równej poziomowi szumu, znormalizowanego do jednostkowej szerokości pasma.

$NEP$  wyraża się w [ $\text{W}/\text{Hz}^{1/2}$ ]:

$$NEP = \frac{V_n}{R_V} = \frac{I_n}{R_I},$$

gdzie:  $V_n$  – widmowa gęstość skutecznego napięcia szumów,  $R_V$  – widmowa gęstość prądu szumów,  $I_n$  – sygnał.

### 3.8. Wykrywalność znormalizowana $D^*$

Określa ona stosunek sygnału do szumu odniesiony do jednostkowego strumienia promieniowania padającego na detektor i przypadający na jednostkę powierzchni detektora.

$$D^* = \frac{A^{1/2}}{NEP} = \frac{R_V (A \Delta f)^{1/2}}{V_n},$$

gdzie:  $A$  – powierzchnia detektora,  $NEP$  – moc równoważna szumom,  $R_V$  – czulość napięciowa układu,  $\Delta f$  – szerokość pasma szumowego układu.

## 4. WŁAŚCIWOŚCI TELLURKU KADMOWO-RTĘCIOWEGO

Tellurek kadmowo-rtęciowy ( $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ) jest roztworem stałym, krystalizującym w strukturze blendy cynkowej w całym zakresie składu  $0 < x < 1$ . Współczynnik  $x$  oznacza skład molowy warstwy aktywnej diody, czyli warstwy absorbującej promieniowanie elektromagnetyczne padające na próbkę. Jony Te w sieci krystalicznej są otoczone przez czterech sąsiadów. Mogą nimi być jony Cd lub Hg. Aniony są rozmieszczone w roztworze ze średnią gęstością zależną od składu materiału.

Rozpuszczalność HgCdTe w rtęci jest niewielka, silnie zależy od składu materiału (maleje ze wzrostem wartości  $x$ ) w  $600^\circ\text{C}$  rozpuszczalność CdTe wynosi zaledwie 1,5%.

Rozpuszczalność HgCdTe w tellurze jest znacznie większa. Wynosi ona  $\sim 10\%$  dla  $\text{Cd}_{0,2}\text{Hg}_{0,8}\text{Te}$  w  $500^\circ\text{C}$ , maleje ze wzrostem zawartości CdTe.

Tellurek kadmowo rtęciowy jest materiałem trudnym technologicznie ze względu na wysokie ciśnienie par rtęci, słabe wiązanie rtęci oraz wysokie współczynniki interdyfuzji Hg i Cd. Jednak dzięki wprowadzeniu zmian w technologii przez stosowanie struktur heterozłączowych udało się zapobiec tym zjawiskom. Jednym z wielu zalet materiału są natomiast:

- mała zmiana stałej sieciowej przy zmianie składu molowego ( $x$ ),
- regulowana przerwa energetyczna ( $E_g$ ) (w zależności od składu jej wartość może się zmieniać od 0 do 1,6 eV, co odpowiada długości fali padającego promieniowania od 0,7 do 25  $\mu\text{m}$ ),
- wysoki współczynnik pochłaniania ( $\alpha$ ),
- wysoki współczynnik efektywności ( $\alpha/G$ ),
- mała szybkość generacji termicznej nośników,
- długi czas życia nośników mniejszościowych,
- wysoka wydajność kwantowa, bez pokryw antyrefleksyjnych nawet rzędu 70%,
- inne [9 10].

HgCdTe stanowiło podstawę dla rozwoju trzech generacji detektorów promieniowania podczerwonego. Pierwszą generację stanowią liniowe mozaiki detektorów fotoprzewodzących, które były produkowane w dużych ilościach w przeszłości i są w masowym użytkowaniu do dzisiaj. Druga generacja to dwuwymiarowe matryce detektorów

fotowoltaicznych. Detektory te (fotodiody) są obecnie produkowane na szeroką skalę – tysiące matryc rocznie. Trzecia generacja, to bardziej osobliwe struktury dwubarwnych detektorów (fotodiody lawinowe) oraz matryce hiperspektralne. Urządzenia te oferują wysoką funkcjonalność. Potrzeba jednak co najmniej kilku lat, aby weszły do masowej produkcji. Wnikliwa analiza urządzeń trzeciej generacji detektorów z HgCdTe została dokonana m.in. w pozycjach zamieszczonych w literaturze [2 - 3, 11].

Więcej szczegółowych informacji na temat telurku kadmowo-rtęciowego znajduje się w pracy magisterskiej [14].

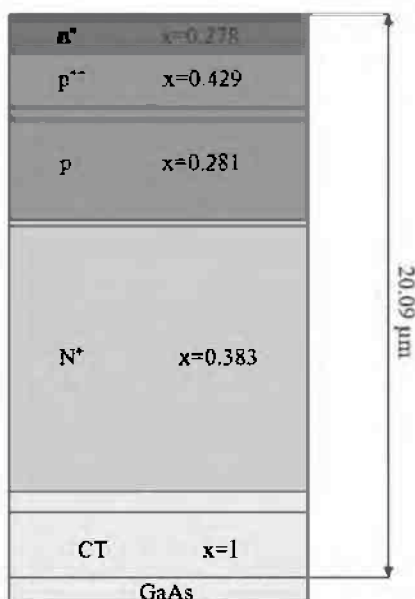
## 5. EKSPERYMENT

### 5.1. Omówienie materiału wyjściowego

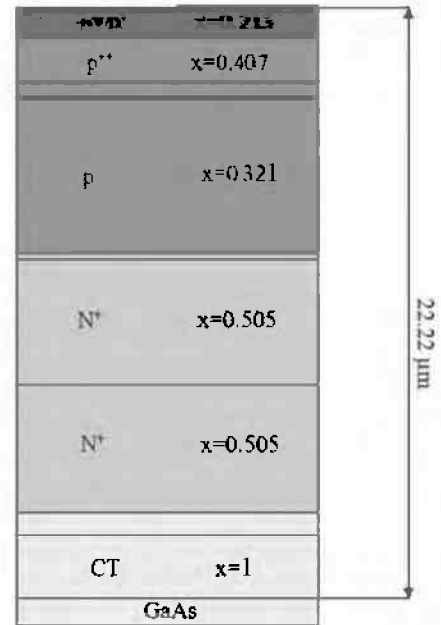
Za materiał wyjściowy posłużyły 2 heterostruktury  $\text{Hg}_{(1-x)}\text{Cd}_x\text{Te}$ . Według założeń otrzymanych w raporcie od firmy Vigo System skład planowany ( $x_p$ ) warstwy aktywnej struktury 1492 wynosił,  $x_p = 0,316$ , natomiast dla struktury 1855  $x_p = 0,281$ . Otrzymane heterostruktury różniły się nie tylko składem chemicznym poszczególnych podwarstw, ale również ich grubością. Jako podłoża wykorzystane zostały płytki z GaAs, którego niedopasowanie sieciowe wynosi  $\sim 14,6\%$ . Zmniejsza się je przez wzrost warstwy buforowej (CdTe) kompensującej niedopasowanie sieciowe między HgCdTe a podłożem.

Przekroje poprzeczne charakteryzowanych heterostruktur wraz z nazewnictwem poszczególnych

(a)



(b)

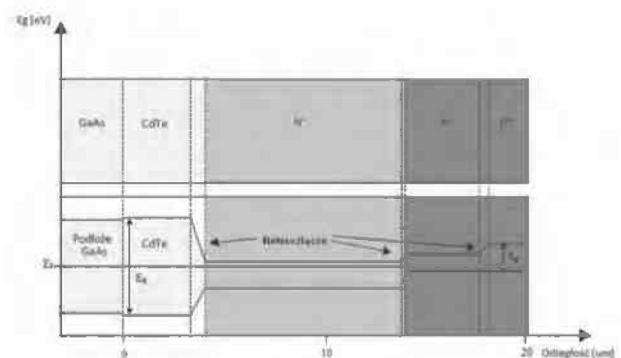


Rys. 6. Przekroje poprzeczne charakteryzowanych warstw: a) dioda 1492, b) dioda 1855.

Fig. 6. The cross sections of characterized layers: a) 1492 photodiode, b) 1855 photodiode.

podwarstw oraz składem najważniejszych z nich są widoczne na Rys. 6. Kolejno od góry widoczne są: warstwa kontaktowa typu n, warstwy typu p absorbujące promieniowanie, warstwa kontaktowa n, bufor CdTe oraz podłoże GaAs.

Profil energetyczny wybranej heterostruktury (1492) w funkcji składu poszczególnych warstw jest przedstawiony na Rys. 7.



Rys. 7. Profil przerwy energetycznej dla struktury HgCdTe 1492.

Fig. 7. The energy gap profile of HgCdTe 1492 heterostructure.

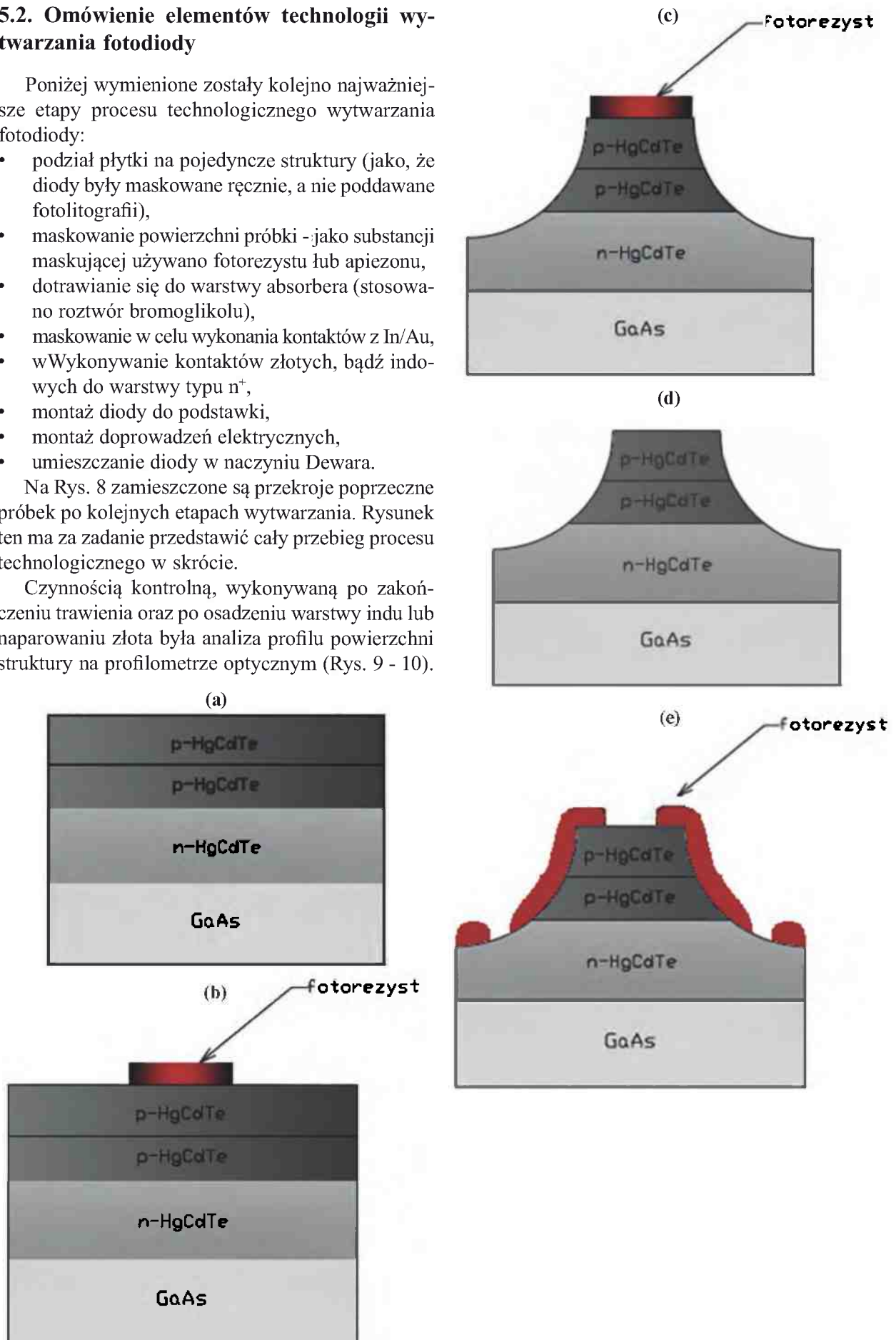
## 5.2. Omówienie elementów technologii wytwarzania fotodiody

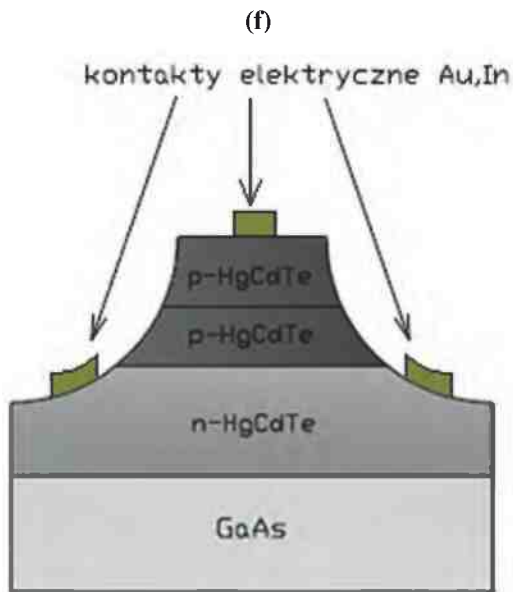
Poniżej wymienione zostały kolejno najważniejsze etapy procesu technologicznego wytwarzania fotodiody:

- podział płytki na pojedyncze struktury (jako, że diody były maskowane ręcznie, a nie poddawane fotolitografii),
- maskowanie powierzchni próbki -jako substancji maskującej używano fotorezystu lub apiezonu,
- dotrawianie się do warstwy absorbera (stosowano roztwór bromoglikolu),
- maskowanie w celu wykonania kontaktów z In/Au,
- wykonywanie kontaktów złotych, bądź indowych do warstwy typu  $n^+$ ,
- montaż diody do podstawki,
- montaż doprowadzeń elektrycznych,
- umieszczanie diody w naczyniu Dewara.

Na Rys. 8 zamieszczone są przekroje poprzeczne próbek po kolejnych etapach wytwarzania. Rysunek ten ma za zadanie przedstawić cały przebieg procesu technologicznego w skrócie.

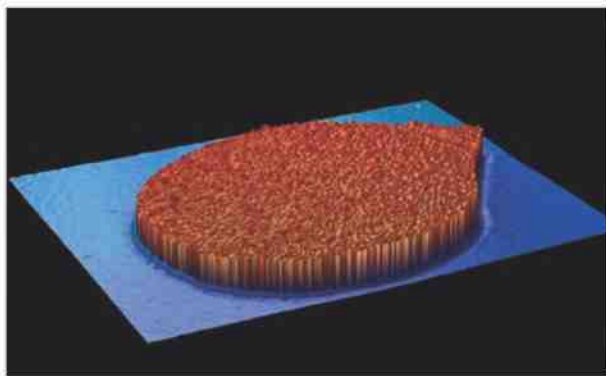
Czynnością kontrolną, wykonywaną po zakończeniu trawienia oraz po osadzeniu warstwy indy lub naporowaniu złota była analiza profilu powierzchni struktury na profilometrze optycznym (Rys. 9 - 10).





**Rys. 8.** Kolejne etapy technologiczne procesu wytwarzania fotodiody typu mesa, a) przekrój przez warstwę HgCdTe, b) próbka pokryta substancją maskującą, c) strawienie niezamaskowanego obszaru próbki, d) zmycie substancji maskującej, e) maskowanie w celu wykonania kontaktów elektrycznych, f) gotowa struktura.

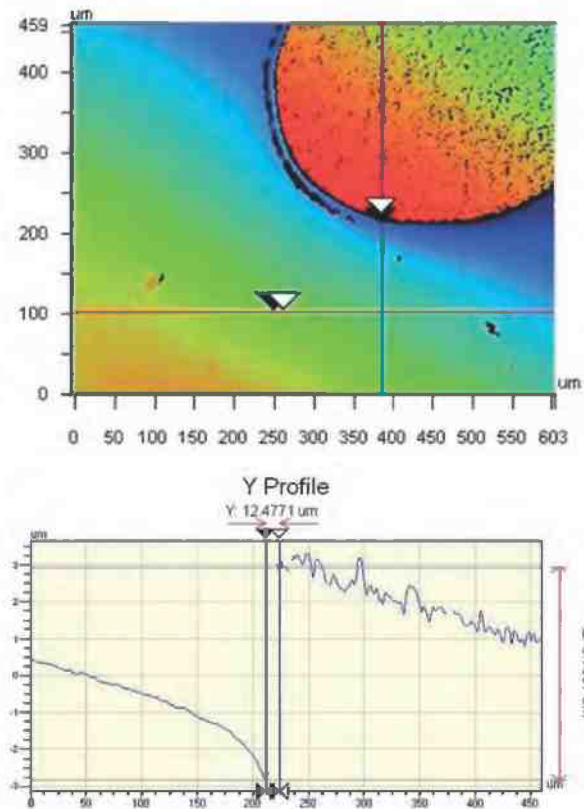
**Fig. 8.** Successive technological stages of receiving a mesa photodiode, a) cross-section through a HgCdTe layer, b) a sample covered with a masking substance, c) etching of the uncovered area of a sample, d) washing the masking substance off, e) masking for the implementation of electrical contacts, f) the finished structure.



**Rys. 9.** Widok przykładowej struktury fotodiody po trawieniu otrzymany za pomocą profilometru optycznego.

**Fig. 9.** View of a photodiode structure after etching on the optical profilometer.

Sprawdzano w ten sposób chropowatość materiału oraz to, czy głębokość strawienia nie jest za mała, bądź za duża (czy nie dotrawiono się do warstwy buforowej). Zdjęcie na Rys. 8 po lewej stronie pokazuje widok diody od góry. Znajdujący się w prawym górnym rogu wyodrębniony okrąg, to zamaskowany podczas trawienia (a co za tym idzie niewytrawiony) obszar mesy. Linia pionowa przecinająca mesę, to płaszczyzna próbki, wzdłuż której został wykonany

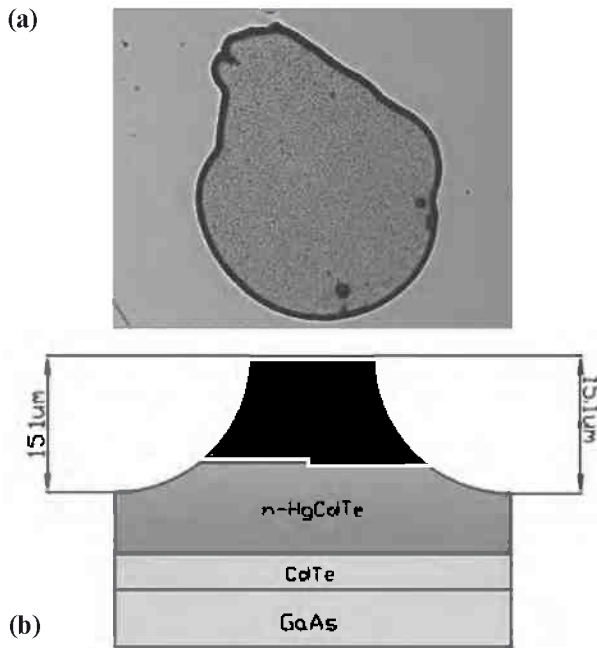


**Rys. 10.** Głębokość strawienia materiału dla przykładowej fotodiody (struktura 1492).

**Fig. 10.** Depth of the material etching off for an photodiode (structure 1492).

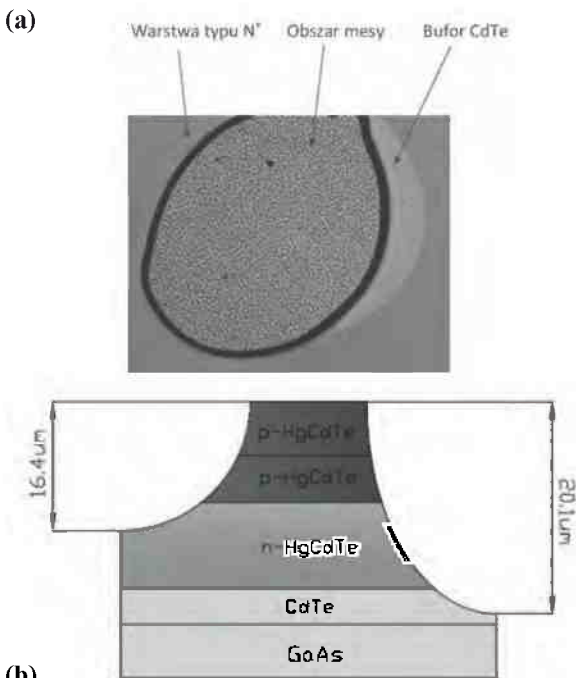
miar głębokości strawienia. Pomiar był w tym wypadku wykonywany wzdłuż osi y. Profil przekroju wzdłuż płaszczyzny pomiarowej jest zobrazowany na wykresie po prawej stronie. Oś pozioma wykresu odpowiada osi pionowej (osi y) na rysunku po lewej stronie. Oś pionowa zaś obrazuje głębokość. Wyżej leżąca krzywa na wykresie obrazuje widoczną na zdjęciu po lewej stronie płaszczyznę mesy, zaś niższa krzywa odpowiada za strawiony obszar diody. Nad czerwoną linią wymiarową z boku wykresu podana jest głębokość strawienia. Pomimo, że w artykule zamieszczono jedynie przekrój przez próbkę wykonany wzdłuż osi y, to podczas wykonywania badań przeprowadzono pomiary wzdłuż obu osi w celu sprawdzenia, czy wyniki są ze sobą zbieżne. W celu uzyskania jak najlepszych struktur głębokości strawienia we wszystkich miejscach próbki powinny być równe. Jakość trawienia ma bowiem bardzo duży wpływ na przyszłe parametry diod. Na Rys. 11 - 12 znajduje się porównanie widoków diod prawidłowo oraz nieprawidłowo wytrawionych.





**Rys. 11.** Próbką 1492\_3\_D2 - prawidłowo strawiona z wszystkich stron: a) zdjęcie wykonane pod mikroskopem Olympus, b) przekrój poprzeczny przez próbkę.

**Fig. 11.** 1492\_3\_D2 sample properly etched from all sides: a) a photo taken under a microscope Olympus, b) cross section through the sample.



**Rys. 12.** Próbką 1855\_c - nierównomiernie strawiona. Jedynie niewielki obszar po lewej stronie próbki nie jest przetrawiony. W pozostałych miejscach dotrawiono się do warstwy bufora: a) zdjęcie wykonane pod mikroskopem Olympus, b) przekrój poprzeczny przez próbkę.

**Fig. 12.** Sample 1855\_c - unevenly etched. Only a small area on the left side of the sample is not overetched. Other places are etched to the buffer layer: a) picture taken under a microscope Olympus, b) cross section through the sample.

### 5.3. Pomiary fotoelektryczne otrzymanych fotodiod – opis metod i aparatury

W rezultacie badań nad heterostrukturami z HgCdTe otrzymano 17 działających diod, w tym 9 diod z heterostruktury oznaczonej numerem 1492 oraz 8 diod z heterostruktury oznaczonej numerem 1855. Następnie przeprowadzono charakteryzację otrzymanych fotodiod.

W ramach badań dokonano pomiarów:

- charakterystyk prądowo – napięciowych,
- Pomiaru charakterystyk prądowo - napięciowych dokonywano w specjalnie do tego celu stworzonym programie sterującym. Program ten służy do czytania wartości z mierników w odpowiednim czasie. Diodę podłączano do woltomierza KEITHLEY 2000 MULTIMETER o rozdzielczości  $10 \mu\text{V}$  w zakresie pomiaru do 1 V. Do zasilania układu użyto programowalne źródło prądowe KEITHLEY 2000 PROGRAMMABLE CURRENT SOURCE (Rys. 13). W celu wykonania pomiarów wstępnie ustawiano krok pomiarowy (jego wartość musi być wystarczająco wysoka, aby przebić szumy własne detektora, lecz na tyle niska, aby nie doszło do zniszczenia diody) oraz ilość punktów w kierunku przewodzenia i zaporowym i mierzono prąd w obu kierunkach kolejno dla 3 temperatur.



**Rys. 13.** Stanowisko do pomiaru charakterystyk I-V.

**Fig. 13.** Position to measure the current-voltage characteristics.

Charakterystyki prądowo – napięciowe pozwalają na wyznaczenie rezystancji dynamicznej diody w funkcji napięcia polaryzującego oraz iloczynu  $R_A$ . Iloczyn ten pozwala na określenie parametrów powierzchniowych i objętościowych dla fotodiod wytworzonych z jednego materiału. Ze zlogarytmowanej charakterystyki I-V można także określić gęstość prądu nasycenia  $J_s$  oraz współczynnik  $\beta$ , określający proporcję między prądem dyfuzyjnym

a generacyjno - rekombinacyjnym na podstawie nachełnienia prostej.

Dokonano również pomiaru:

- charakterystyk spektralnych czułości względnej w funkcji długości fali (spektrometr furierowski)

Pomiaru charakterystyk spektralnych dokonywano za pomocą układu składającego się ze spektrometru furierowskiego oraz podłączonych do niego 2 detektorów: wewnętrznego (do pomiaru sygnału odniesienia) i zewnętrznego (do pomiaru sygnału diody). Najpierw mierzono sygnał odniesienia a następnie sygnał diody zamieszczonej w dewarze i podpiętej do układu, co pokazuje zdjęcie poniżej (Rys. 14). Z zapisanych wyników można wyznaczyć charakterystykę czułości względnej diody w funkcji długości fali  $\lambda$ . Z charakterystyk spektralnych, zwanych także widmowymi, można wyznaczyć także sprawność kwantową detektora.



Rys. 14. Spektrometr fourierowski oraz podłączone do niego detektory.

Fig. 14. Fourier spectrometer with connected detectors.

Pomiary charakterystyk spektralnych mogą być także wykonywane za pomocą monochromatora. Są to pomiary czułości prądowej i napięciowej w funkcji długości fali. Zaletą tej metody jest wybór fali o określonej długości z promieniowania o szerokim paśmie.

Pomiary przeprowadzono w 3 temperaturach:

- 300 K,
- 77 K (zalenie diody ciekłym azotem),
- 200 K (zalenie diody metanolem i ochładzanie ciekłym azotem).

## 5.4. Opracowanie wyników

### 5.4.1. Charakterystyki I-V

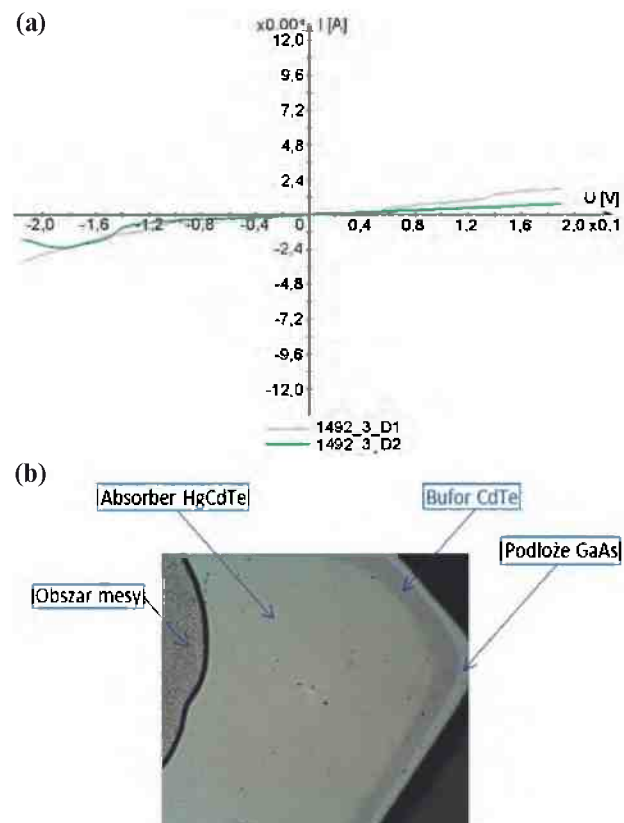
Kształty charakterystyk prądowo napięciowych detektorów zależą od bardzo wielu czynników. Należą do nich m.in.:

• jakość oraz czystość heterostruktur, ich budowa (skład oraz szerokość przerwy energetycznej poszczególnych podwarstw, miejsce umieszczenia złącza p-n itp.), poprawność przeprowadzenia kolejnych etapów procesu technologicznego, rodzaj kontaktów elektrycznych, średnica diod oraz ich kształt, temperatura przeprowadzania pomiarów i wiele innych.

Poniżej znajduje się omówienie wyników pomiarów charakterystyk I-V w zależności od czynników, w znacznej mierze wpływających na te wyniki:

### • Błędy popełnione podczas trawienia

Jeśli chodzi o poprawność przeprowadzenia procesu technologicznego w zasadzie każdy etap może być niewłaściwy i przesądzić o parametrach przyszłej diody. Jednym z nich jest etap trawienia obszaru mesa. Wykresy diod 1492\_3\_D1 i D2 w 300 K bardzo odbiegają od charakterystyk idealnej diody (Rys. 15a). Rezystancja zarówno przy prądzie w kierunku przewodzenia, jak i zaporowym ma bardzo wysoką wartość. Przyczyną tego może być dotrawienie się do warstwy podłoża oraz rysy, powstałe najprawdopodobniej podczas procesu tech-



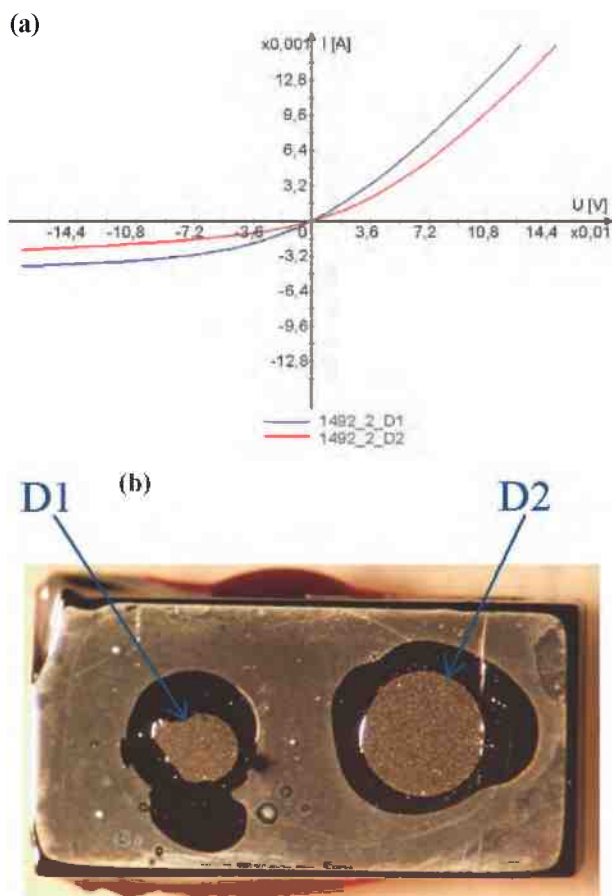
Rys. 15. a) Charakterystyki prądowo-napięciowe fotodiod: 1492\_3\_D1, 1492\_3\_D2; b) zdjęcie przetrawionej próbki 1492\_3.

Fig. 15. a) Current-voltage characteristics of: 1492\_3\_D1 and 1492\_3\_D2 photodiodes; b) a photo of an overetched 1492\_3 sample.

nologicznego, które mogły spowodować rozwarście diod (Rys. 15b).

### • Wielkość mes

Poniższy przykład (Rys. 16) pokazuje 2 diody różniące się wielkością (pomiar wykonywany w 300 K). W kierunku przewodzenia obserwujemy prawie liniowy kształt charakterystyk odzwierciedlający rezystancję szeregową (Rys. 16 a). Obserwuje się także brak nasycenia prądu. Około 4 razy większy rozmiar diody D2 jest prawdopodobnie przyczyną nieco niższej wartości rezystancji w porównaniu z diodą 1492\_2\_D1. Rezystancja diody D1 w 300 K wynosi  $37,4 \Omega$ , a diody D2 –  $14,5 \Omega$ . Przy pomiarze w kierunku zaporowym widoczny jest duży wzrost rezystancji obu fotodiod (spadek nachylenia charakterystyki), co świadczy o wysokim iloczynie  $R_0A$  diody oraz o wysokiej wartości wydajności kwantowej [15].



**Rys. 16.** a) Charakterystyki prądowo-napięciowe fotodiod: 1492\_2\_D1 i D2; b) zdjęcie próbki 1492\_2.

**Fig. 16.** a) Current-voltage characteristics of: 1492\_2\_D1 and D2 photodiodes; b) a photo of a 1492\_2 sample.

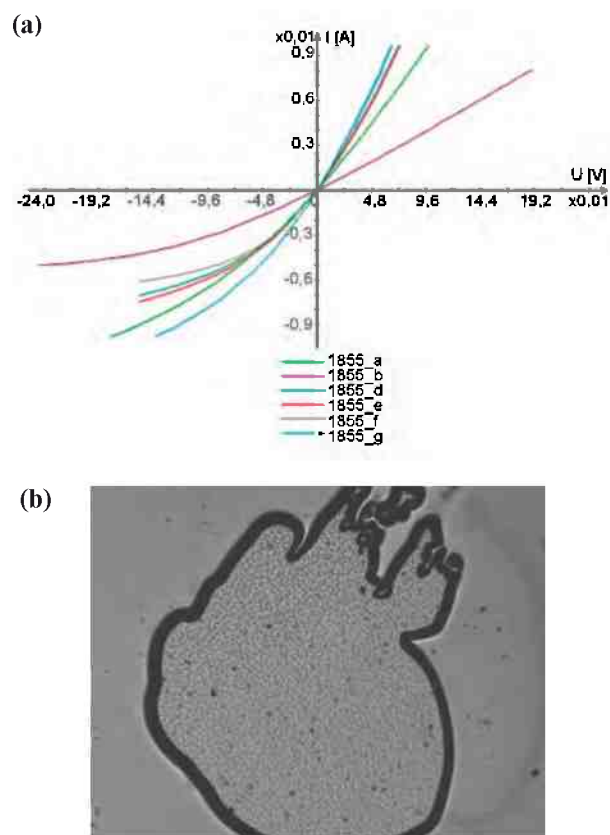
### • Kształt mes

Na Rys. 17 a (pomiar również wykonano w 300 K) widać, że charakterystyka jednej z diod odbiega

kształtem od pozostałych. Jest to dioda 1855\_b, natomiast jej zdjęcie wykonane pod mikroskopem po trawieniu (Rys. 17 b) tłumaczy kształt charakterystyki. Widoczny na wykresie wyraźny spadek rezystancji w kierunku przewodzenia może być mianowicie wywołany licznymi strefami upływności zwiększającymi w rzeczywistości obwód mesy.

### • Generacja termiczna nośników

Porównanie wykresów z Rys. 17a - b obrazuje także inną bardzo ciekawą zależność. Diody ze struktury 1855 są to diody bardziej długofalowe niż te ze struktury 1492. Ze względu na stosunkowo małą wartość przerwy energetycznej w porównaniu do średniofalowych diod 1492 ( $\lambda_c = hc/E_g$ ) w wysokich temperaturach łatwo zachodzi w nich zjawisko generacji termicznej nośników. Zjawisko to jest bardzo niekorzystne i powoduje zmniejszenie czułości diody. Przeważającym mechanizmem absorpcji jest w tym wypadku absorpcja domieszkowa (fale długie). O wysokiej generacji termicznej świadczy niższa rezystancja diod na Rys. 17 w porównaniu do diod z Rys. 16, zarówno przy pomiarze w kierunku zaporowym, jak i w kierunku przewodzenia. W celu



**Rys. 17.** a) Charakterystyki prądowo-napięciowe fotodiod ze struktury 1855; b) zdjęcie próbki 1855.

**Fig. 17.** a) Current-voltage characteristics of 1855 photodiodes; b) a photo of a 1855 sample.

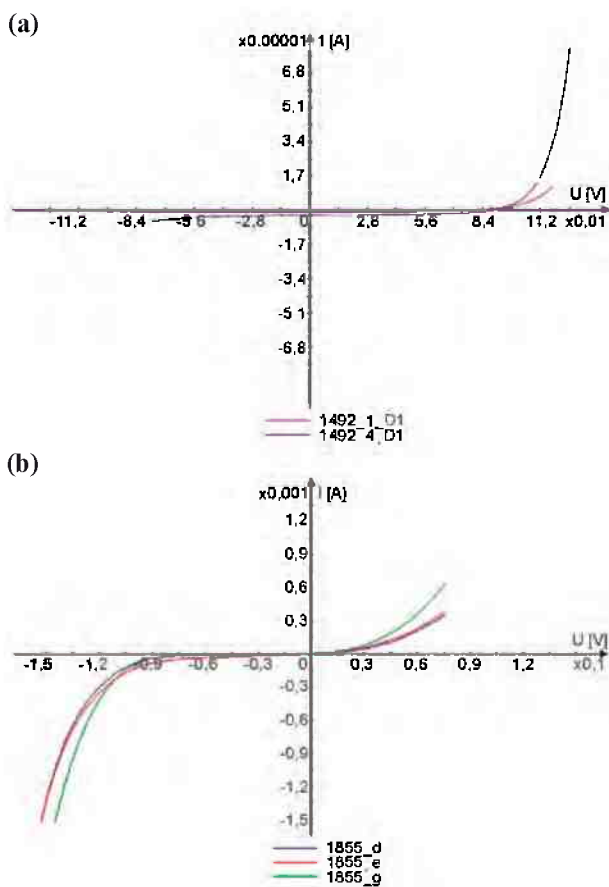
poprawnego działania tych detektorów wymagane jest ich chłodzenie [4, 6].

### • Temperatura pracy 77 K

Schłodzenie detektorów do temperatury 77 K wywarło bardzo duży wpływ na ich właściwości (Rys. 18a - b). Przede wszystkim nie zachodzi tu, aż w takim stopniu, jak poprzednio generacja termiczna nośników. Analizując charakterystyki I-V diod 1492\_1\_D1 i 1492\_4\_D1 można zauważyć, że prąd zdecydowanie wzrasta po przekroczeniu tzw. napięcia progowego (Rys. 18a).

### • Wpływ chłodzenia detektorów na kontakty elektryczne

Ograniczeniem wartości prądu diod 1491\_1\_D1 i 1492\_4\_D1 w kierunku przewodzenia jest określona wartość rezystancji szeregowej półprzewodnika, na którą składają się rezystancja poza obszarem złącza oraz rezystancja na innych elementach konstrukcyjnych diody (kontakty elektryczne, doprowadzenia, oprawki) (Rys. 18a) [16].



Rys. 18. Charakterystyki prądowo-napięciowe fotodiod: a) 1492\_1\_D1 i 1492\_4\_D1; b) 1855\_d, e i g.

Fig. 18. Current-voltage characteristics of: a) 1492\_1\_D1 and 1492\_4\_D1 photodiodes; b) 1855\_d, e and g photodiodes.

### • Fotoprąd

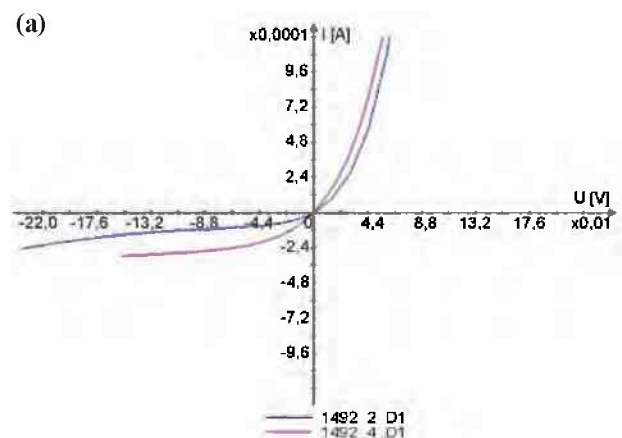
Na Rys. 18a widoczne jest niewielkie przesunięcie charakterystyki równoległe w dół do osi prądu, spowodowane przez padające promieniowanie elektromagnetyczne (być może dioda była niedokładnie zaciemniona). Przesunięcie to odzwierciedla wartość fotoprądu diody i może świadczyć o wysokiej wykrywalności struktur.

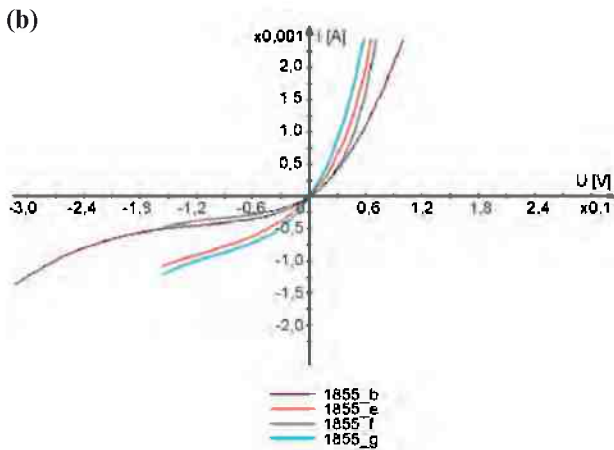
### • Zjawisko przebicia przelawinowego

W przypadku diod 1855 (Rys. 18b) przy zwiększaniu napięcia polaryzującego diodę w kierunku zaporowym prąd osiąga wartość ustaloną – prąd nasycenia – jednocześnie rośnie natężenie pola elektrycznego w obszarze ładunku przestrzennego (w złączu p-n). Efekt ten nazywany jest przebiciem lawinowym i polega na zwiększeniu szybkości nośników prądu pod wpływem wzrostu natężenia pola elektrycznego. Nośniki te, po przekroczeniu pewnej wartości granicznej będą powodowały powstawanie nowych nośników prądu podczas zderzeń z obojętnymi cząstkami. Nowe nośniki powodują zwiększenie wartości prądu i mogą stać się źródłem powstawania kolejnych nośników. Zjawisko to jest na ogół niekorzystne i najczęściej prowadzi do uszkodzenia diody.

### • Pomiar w 200 K

W przypadku obu heterostruktur najlepsze wyniki uzyskiwano, gdy diody były chłodzone do temperatury 200 K. Świadczą o tym poniższe charakterystyki (Rys. 19 a i b). Wykresy na nich są zbliżone do charakterystyk idealnej diody. Odznaczają się one niską rezystancją dynamiczną i szeregową w kierunku przewodzenia. Przy pomiarze w kierunku zaporowym widoczny jest znaczący wzrost rezystancji obu fotodiod, co świadczy o wysokim iloczynie  $R_0A$  oraz o wysokiej wartości wydajności kwantowej. Otrzymane parametry są dowodem na to, że materiał na diody był jednorodny, nie zawierał defektów, czy też zanieczyszczeń.





**Rys. 19.** Charakterystyki prądowo-napięciowe fotodiod: a) 1492\_2\_D1, b) 1492\_4\_D2; b) 1855\_b,e,f i g.  
**Fig. 19.** Current-voltage characteristics of: a) 1492\_2\_D1 and 1492\_4\_D2 photodiodes; b) 1855\_b,e,f and g photodiodes.

#### 5.4.2. Charakterystyki spektralne

Charakterystyki spektralne (Rys. 20) przedstawiają diody ze struktury 1492 (Rys. 20a) oraz ze struktury 1855 (Rys. 20b) mierzone w różnych temperaturach. Niebieską linią zaznaczono pomiar w 77 K, zieloną w 200 K, natomiast czerwoną w 300 K. Tak samo, jak w omówionym już wcześniej wypadku charakterystyk I-V mamy do czynienia z najwyższymi wartościami parametrów w 200 K dla obu heterostruktur, najniższymi zaś w 77 K.

Do głównych czynników warunkujących przebieg otrzymanych charakterystyk spektralnych należą:

- **Pochłanianie promieniowania**

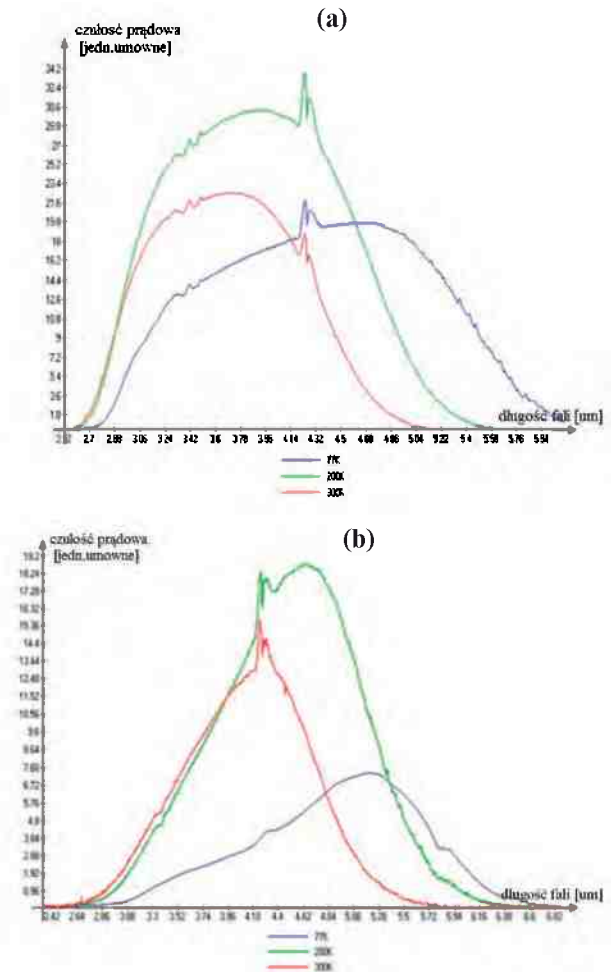
Szczególną uwagę zwracają pojawiające się w pewnych miejscach zaburzenia charakterystyk. W tym wypadku dla obu struktur przedział, w jakim zaburzenia te występują waha się od  $\sim 4,2$  do  $\sim 4,5 \mu\text{m}$ . Zachwianie przebiegu charakterystyk w tym zakresie jest wynikiem pochłaniania promieniowania na cząsteczkach pary wodnej przy określonych długościach fali promieniowania elektromagnetycznego [3].

- **Odpowiedni dobór okienka pomiarowego**

Rozpiętość długości fali promieniowania, dla których były wykonywane pomiary wynosiła od  $\sim 2,5$  do  $6 \mu\text{m}$  i była zależna od zakresu użytego okienka atmosferycznego (odpowiednio dla fal krótszych – okienko białe, dla fal dłuższych – okienko żółte). Tłumaczy to, czemu charakterystyki nie rozpoczynają się od zera.

- **Długość fali odcięcia  $\lambda_c$  diod i związana z nią długofalowa granica czułości**

Porównując obie charakterystyki wyraźnie widać różnicę w ich długofalowej granicy czułości. Długość fali odcięcia diody z wykresu na Rys. 20a jest mniejsza niż na Rys. 20b. Na podstawie analizy tych danych można wnioskować, że diody ze struktury 1492 są diodami średniofalowymi, natomiast diody ze struktury 1855 mają bardziej długofalowy charakter.



**Rys. 20.** Charakterystyki spektralne fotodiod: a) ze struktury 1492; b) 1855.

**Fig. 20.** Spectral characteristics of: a) 1492 photodiodes; b) 1855 photodiodes.

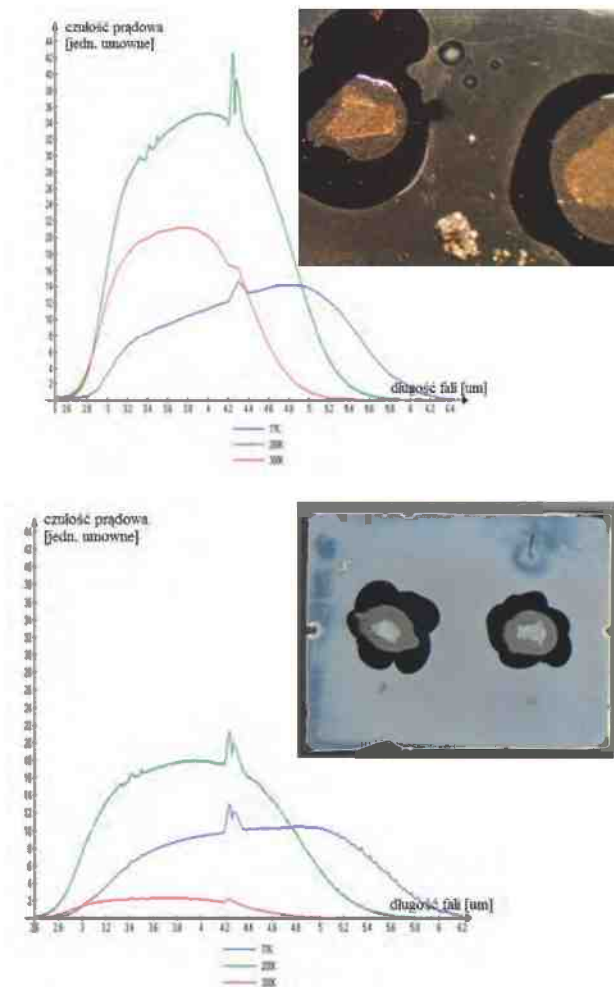
- **Temperatura pracy detektorów**

Wykresy pokazują też wyraźną tendencję do wzrostu długofalowej granicy czułości wraz ze spadkiem temperatury prowadzonych pomiarów. Wyjaśnienia tego zjawiska należy się dopatrywać w zależności szerokości przerwy zabronionej od temperatury oraz we właściwościach HgCdTe. W materiale tym bowiem, w przeciwieństwie do

innych materiałów, następuje zmniejszenie  $E_g$  wraz ze spadkiem temperatury pracy detektora, a co za tym idzie wzrost  $\lambda_c$ .

### • Typ kontaktów elektrycznych

Na Rys. 21 znajduje się porównanie czułości prądowej fotodiody z kontaktami złotymi do warstwy typu p (Rys. 20a) i indowymi (Rys. 20b) w różnych temperaturach pracy. Widoczne są wyższe wartości czułości prądowej w wypadku diody z kontaktami złotymi. Ponadto widoczne są ponownie najlepsze wyniki obu diod w temperaturze 200 K. Kontakty złote mają tę przewagę nad indowymi, że promieniowanie docierające do powierzchni diody odbija się od nich i powraca do warstwy absorbera. W ten sposób wzrasta absorpcja promieniowania, a co za tym idzie również wydajność kwantowa [6].

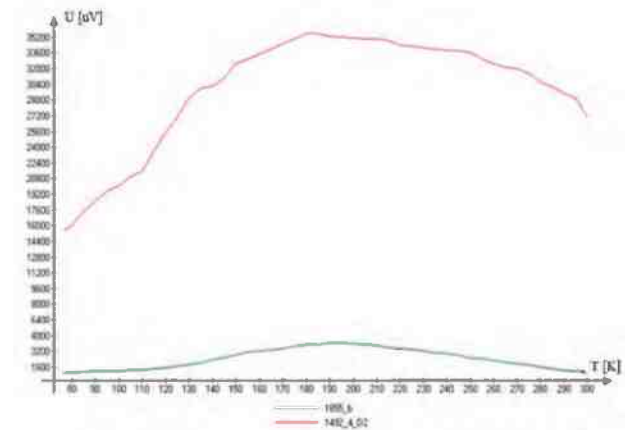


**Rys. 21.** Próbką 1492: a) kontakty złote do warstwy typu p, b) kontakty indowe do warstwy typu p.

**Fig. 21.** The 1492 sample: a) gold contacts to the p-type layer, b) indium contacts to the p-type layer.

Dla fotodiod odznaczających się jednymi z najlepszych parametrów dokonano także pomiaru czu-

łości prądowej w funkcji temperatury dla długości fali przy której diody te osiągały największy sygnał. W wypadku warstwy 1492 wybrano fotodiodę 1492\_4\_D2 dla której największy sygnał występował przy długości fali równej  $\sim 4 \mu\text{m}$ , natomiast dla warstwy 1855 była to dioda 1855\_b z największą wartością sygnału przy długości fali równej  $\sim 5 \mu\text{m}$ .



**Rys. 22.** Charakterystyka czułości w funkcji temperatury dla diody 1492\_4\_D2 i diody 1855\_b przy maksymalnej długości fali.

**Fig. 22.** Characteristics of sensitivity as a function of temperature for the 1492\_4\_D2 and 1855\_b photodiodes at the maximum wavelength.

Jak widać na załączonym wykresie (Rys. 22), dioda ze struktury 1492 osiąga o wiele wyższe wartości czułości prądowej niż dioda ze struktury 1855. W wypadku struktury 1492 maksymalny sygnał wynosi  $\sim 35,6 \text{ mV}$  w temperaturze 185 K. Dla diody otrzymanej z materiału 1855 maksymalny sygnał wynosi  $\sim 4000 \mu\text{V}$  w 190 K. Można więc wyciągnąć wniosek, że materiał o numerze 1492 potencjalnie bardziej nadaje się do wykonania detektorów podczerwieni niż 1855 ze względu na wyższe wartości osiąganych parametrów. Ponownie potwierdzono, że najwyższe wartości parametrów dla obu diod można otrzymać w temperaturze bliskiej 200 K.

## 6. OBLICZENIE PARAMETRÓW I ICH PORÓWNANIE Z PARAMETRAMI LITERATUROWYMI

Większość uzyskanych wyników, w tym charakterystyki wykonane na spektrometrze furierowskim oraz końcowe charakterystyki temperatury w funkcji napięcia świadczą o tym, że materiał na heterostrukture, z których wykonano diody (zarówno ze struktury 1492, jak i 1855) był optymalizowany

na pracę w  $\sim 200$  K. Dowodem tego są najlepsze parametry diod w tej temperaturze. W niektórych jednak wypadkach następowały odstępstwa od tej zależności. Najprawdopodobniej przyczyną ich były mało stabilne kontakty elektryczne a zalanie substancją chłodzącą powodowało dodatkowe pogorszenie ich jakości.

Z uzyskanych charakterystyk spektralnych wynika, że otrzymane heterostruktury różnią się wartościami długofalowej granicy fotoczułości. W strukturach 1492 w temperaturze 300 K znajduje się ona przy długości fali  $\sim 4$   $\mu\text{m}$ , natomiast w strukturach

1855 przy długości fali  $\sim 5$   $\mu\text{m}$  i rośnie wraz ze spadkiem temperatury pracy detektora.

Tabele 1 i 2 zawierają zestawienie parametrów diod z obu heterostruktur, które odznaczały się jednymi z najlepszych osiągnięć oraz ich porównanie z danymi literaturowymi [3, 7, 17]. W pierwszej z tabel znajduje się porównanie parametrów diod uzyskanych w eksperymencie w temperaturze 300 K z parametrami literaturowymi, w drugiej zaś porównanie parametrów tych samych diod z parametrami literaturowymi w temperaturze 200 K.

**Tabela 1.** Porównanie parametrów diod uzyskanych w eksperymencie w temperaturze 300 K z parametrami literaturowymi.

**Table 1.** Comparison of diode parameters obtained in the experiment in the temperature of 300 K with literature parameters.

Nazwa diody	T [K]	$\lambda_c$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_o$ [ $\Omega$ ]	$R_o A$ [ $\Omega\text{cm}^2$ ]	$R_I$ [A/W]	$R_V$ [V/W]	$D^*$ [ $\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ ]	$\eta$ [%]
1492_4_D2	300	3,99	20	0,14	0,57	11,4	$5,71 \cdot 10^7$	17,7
1855_b	300	4,5	26	0,182	0,08	2,08	$3,72 \cdot 10^6$	2,2
PV - 1	300	4	1000	0,1	1	1000	$5,0 \cdot 10^9$	31
PV - 2	300	5	100	0,01	1	100	$2,0 \cdot 10^9$	24,8

**Tabela 2.** Porównanie parametrów diod uzyskanych w eksperymencie w temperaturze 200 K z parametrami literaturowymi.

**Table 2.** Comparison of diode parameters obtained in the experiment in the temperature of 200 K with literature parameters.

Nazwa diody	T [K]	$\lambda_c$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_o$ [ $\Omega$ ]	$R_o A$ [ $\Omega\text{cm}^2$ ]	$R_I$ [A/W]	$R_V$ [V/W]	$D^*$ [ $\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ ]	$\eta$ [%]
1492_4_D2	200	4,2	610	4,27	0,82	499	$8,17 \cdot 10^7$	24
1855_b	200	4,9	500	3,5	0,19	973	$9,06 \cdot 10^6$	4,8
PV - 3	200	5,1	550	11	2	1100	$8,4 \cdot 10^9$	48
PV - 4	200	5,3	400	8	1,9	760	$7,0 \cdot 10^9$	44

Parametry otrzymanych detektorów różnią się od parametrów wzorcowych. Uzyskane wydajności kwantowe diody z heterostruktury 1855 są znacznie mniejsze od diod produkowanych obecnie. Natomiast dioda 1492\_4\_D2 ma niższą wydajność kwantową ale jej wartość jest zbliżona do parametrów literaturowych. Należy tu zwrócić uwagę na fakt, iż diody nie były pokrywane powłokami antyrefleksyjnymi, ani też nie były pasywowane. Z tego powodu duża część promieniowania elektromagnetycznego mogła ulec odbiciu od powierzchni półprzewodnika na skutek różnicy współczynnika załamania powietrza i półprzewodnika (odbicie może wynosić nawet do 30% całkowitego promieniowania padającego na detektor).

Na podstawie wyliczeń z wzorów znajdujących się w rozdziale 3 oraz poprzez analizę wykresów charakterystyk widmowych otrzymano wartości  $\lambda_c$  charakteryzowanych detektorów. Następnie wyliczono rzeczywisty skład dla wszystkich otrzymanych diod i wyniki te uśredniono. Z przeprowadzonych obliczeń i analizy danych w Tab. 1 - 2 wynika, że rzeczywisty skład ( $x_{pz}$ ) heterostruktur, otrzymanych w wyniku procesu produkcyjnego nieznacznie różni się od składu planowanego ( $x_p$ ). Dla struktury 1492  $x_{pz}$  wynosi 0,313, podczas gdy planowany skład,  $x_p$  wynosi 0,281. Natomiast dla struktury 1855,  $x_{pz} = 0,291$ , zaś  $x_p = 0,321$ . Należy jednak uwzględnić fakt, iż wyniki otrzymane w pracy są jedynie zbliżone do wartości rzeczywistych, na co wpływ miało wiele

czynników, jak choćby poprawność działania urządzeń, czy też wprawa w przeprowadzaniu pomiarów.

## 7. PODSUMOWANIE

Istnieje bardzo wiele czynników, które w istotny sposób wpływają na parametry detektorów. Nośniki ulegają znacznej generacji termicznej, co w znaczącym stopniu wpływa na ich parametry. Świadczą o tym m.in. zmiany charakterystyk I-V wraz ze zmianą temperatur pracy diod. Zjawisko generacji termicznej można zmniejszyć stosując odpowiednią konstrukcję diody. Istotne znaczenie mają tutaj np. grubości poszczególnych warstw oraz ich skład, położenie złącza p-n i wiele innych [15, 18 - 20]. Aby więc zapobiec niezamierzonym zjawiskom powinno się operacje technologiczne wykonywać w klimatyzowanych pomieszczeniach o wysokiej czystości.

Całkowity czas potrzebny na wykonanie jednej diody oraz przeprowadzenie jej szybkiej charakteryzacji, tzn. wykonanie pomiarów jej charakterystyk, wyniósł od 5 do 7 godzin. Zatem, już na następny dzień można było (oczywiście po wcześniejszym wykonaniu stosownych obliczeń) uzyskać informację zwrotną potwierdzającą (bądź nie) założone parametry. Natomiast pełny cykl produkcyjny jest bardzo żmudnym i powolnym procesem. Jego rozpiętość czasowa wynosi średnio od tygodnia do nawet 2 miesięcy.

Biorąc pod uwagę powyższe fakty stwierdzono, że zastosowanie metody szybkiej charakteryzacji jest skutecznym sposobem ustalania oraz weryfikowania parametrów warstw i ich właściwości i może być z powodzeniem stosowane w ośrodkach zajmujących się produkcją różnego rodzaju materiałów oraz epitaksją na szeroką skalę.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Rogalski A.: Infrared detectors: an overview, *Infrared Physics & Technology*, 43, (2002)
- [2] Norton P.: HgCdTe infrared detectors, *Opto-Electronics Review*, 10 (3), 159–174, (2002)
- [3] Perzanowski D.: Fotodiody z HgCdTe otrzymane metodą trawienia jonowego, praca dyplomowa, (2009)
- [4] Piotrowski J., Rogalski A.: Półprzewodnikowe detektory podczerwieni, WNT 1985
- [5] Szalimowa K.W.: Fizyka półprzewodników, PWN, Warszawa, 1974
- [6] Bielecki Z., Rogalski A.: Detekcja sygnałów optycznych, WNT, Warszawa, 2001
- [7] Rutkowski J.: Fotodiody z roztworów stałych (Hg, X) Te, X = Cd, Zn, Mn. Praca habilitacyjna, Warszawa, 1994
- [8] Tobin S.P., Weiler M.H., Hutchins M.A., Parodos T., Norton P.: Advances in composition control for 16  $\mu$ m LPE p-on-n HgCdTe heterojunction photodiodes for remote sensing applications at 60 K, *Journal of Electronic Materials*, 28, 596-602, (1999)
- [9] Piotrowski J., Rogalski A.: Półprzewodnikowe detektory podczerwieni, WNT 1985
- [10] Madejczyk P.: Wpływ domieszkowania na właściwości warstw HgCdTe, praca doktorska, Warszawa, 2005
- [11] Klos K.: Optymalizacja parametrów epitaksji  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  metodą MOCVD, Praca dyplomowa, Warszawa, 2004
- [12] Rogalski A.: Heterostructure infrared photovoltaic detectors, *Infrared Physics and Technology*, 41, 4, 213-238 (2000)
- [13] Rogalski A.: Infrared detectors: an overview, *Infrared Physics and Technology*, 43 3-5, 187-219, (2002)
- [14] Królicka A.: Szybka charakteryzacja fotodiod z HgCdTe, praca dyplomowa, Warszawa 2010
- [15] Rutkowski J., Rogalski A., Adamiec K.: HgCdTe photodiode passivated with a wide band gap epitaxial layer, Part of the Spie Conference on Photodetectors, Materials and Devices, San Jose, 1999
- [16] Biegalski J., Kaczmarek L., Pietruszewski J., Zdankowski J.: Przyrządy półprzewodnikowe, Jelenia Góra 2008,
- [17] [www.vigo.com.pl](http://www.vigo.com.pl).
- [18] Wenus J., Rutkowski J., Rogalski A.: Two-dimensional analysis of double-layer heterojunction HgCdTe photodiodes, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 48, 7, 1326-1332, (2001)
- [19] Wenus J., Rutkowski J., Influence of valence – band barriers in VLWIR HgCdTe P-on-n heterojunctions on photodiode parameters, *Physica Status Solidi*, 229, 2, 1093-1096, (2002)
- [20] Barczyński R.J.: Metody wytwarzania elementów półprzewodnikowych (prezentacja w programie Power Point), Politechnika Gdańska, 2009