

Konstrukcja dwubarwnych fotodiod podczerwieni

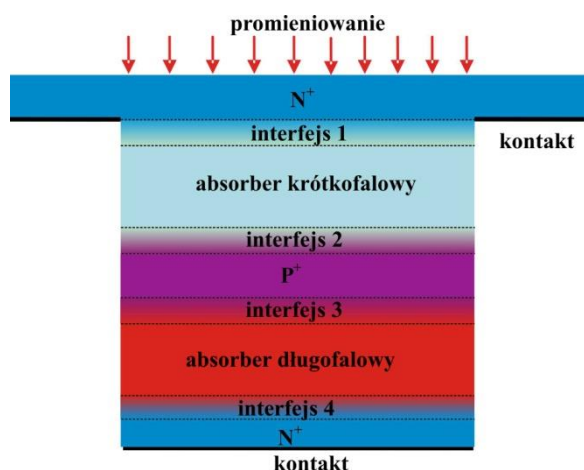
Demonstrator technologii

Celem tego zadania badawczego było opracowanie konstrukcji dwubarwnych fotodiod podczerwieni z tellurku kadmowo rtęciowego (HgCdTe) otrzymywanego metodą MOCVD. Są to fotodiody zakresu widmowego $4\ \mu\text{m}/5\ \mu\text{m}$ pracujące z chłodzeniem termoelektrycznym. Zastosowanie technologii MOCVD umożliwiło dowolne sterowanie inżynierią przerwy energetycznej warstw epitaksjalnych HgCdTe i wytwarzanie wielowarstwowych struktur heterozłączowych niezbędnych do konstrukcji fotodiod dwubarwnych.

Wybór tellurku kadmowo – rtęciowego ($\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$) do konstrukcji detektorów dwubarwnych był podyktowany jego szczególnymi właściwościami. Zmiana szerokości przerwy energetycznej w zależności od składu stechiometrycznego x zdecydowanie ułatwia konstrukcję detektorów dwubarwnych. Należy podkreślić, że jak dotychczas pozycja HgCdTe jako materiału do konstrukcji detektorów podczerwieni nie została podważona osiągnięciami w zakresie półprzewodnikowych struktur niskowymiarowych i fotodiod z supersieci II rodzaju.

Na podstawie rozważań teoretycznych i prac doświadczalnych wybrano strukturę detektora dwubarwnego z HgCdTe o architekturze będącej połączeniem heterozłączowych fotodiod o obszarach aktywnych typu v dla zakresu bardziej krótkofalowego i p dla zakresu bardziej długofalowego. Skoncentrowano się na zakresach widmowych fotodiody dwubarwnej o krawędziach zakresów bardziej krótkofalowego $4\ \mu\text{m}$ i bardziej długofalowego $5\ \mu\text{m}$. Wybrano mod pracy z dwoma kontaktami do struktury z przełączaniem pomiędzy zakresami poprzez zasilanie złącza tzw. mod sekwencyjny. W modzie sekwencyjnym przy zasilaniu w kierunku zaporowym złącza krótkofalowego, złącze długofalowe zasilane jest w kierunku przewodzenia i obserwujemy sygnał z pierwszego złącza czyli z zakresu krótkofalowego. Przy zasilaniu odwrotnym złącze długofalowe spolaryzowane jest w kierunku zaporowym, a krótkofalowe w kierunku przewodzenia, więc sygnał odpowiada zakresowi długofalowemu. W efekcie opracowano konstrukcję fotodiody dwubarwnej o architekturze typu $N^+p\text{-}P^+v\text{-}N^+$ (Rys. 1.). Struktura taka jest wytwarzana w jednym procesie i musi spełniać przy tym prawie idealnie wymogi sprzężenia promieniowania podczerwonego z aktywnym obszarem detektora. Architektura elementów czułych jest rozwinięciem heterozłączowej fotodiody typu P^+pN^+ , składającej się z wąskoprzerwowego absorbera odpowiednio p i v , znajdującego się pomiędzy kontaktami P^+ dla nośników większościowych i N^+ dla mniejszościowych, wykonanymi z silnie domieszkowanego szerokoprzerwowego HgCdTe. Pomiedzy warstwami N^+ , p i P^+ oraz P^+ , v i N^+ znajdują się interfejsy o kontrolowanych profilach domieszkowania i składu. Przezroczystość warstw kontaktowych umożliwia generację optyczną bezpośrednio w absorberze przy równoczesnej izolacji tego obszaru od metalizacji kontaktowej, co zapobiega pasożytniczej generacji i rekombinacji nośników. Przyrząd tego typu potencjalnie może osiągać fundamentalne parametry określone parametrami materiałowymi absorbera. Zwykle obszary absorbera i kontaktów P^+ oraz N^+ są relatywnie jednorodnymi warstwami, pomiędzy którymi znajdują się interfejsy o dużej zmienności składu i domieszkowania. Powstają one nieuchronnie w czasie wzrostu wskutek interdyfuzji głównych składników materiału i dyfuzji domieszek lub są celowo kształtowane za pomocą programowanego wzrostu. Grubości wszystkich warstw, ich składy i poziomy domieszkowania są dobierane dla

pożądaney długości fali promieniowania i temperatury pracy, tak, aby uzyskać maksymalną wykrywalność.



Rys. 1. Konstrukcja dwubarwnej fotodiody N⁺-p-P⁺-v-N⁺.

Architektura przyrządu jest optymalizowana za pomocą modelowania analitycznego, symulacji komputerowej i badań eksperymentalnych, tak aby uzyskać:

- optymalną relację pomiędzy wydajnością kwantową promieniowania o żądanej długości fali a szybkością generacji termicznej;
- zminimalizowanie generacji i rekombinacji termicznej;
- odcięcie promieniowania krótkofalowego poprzez odpowiedni dobór składu warstwy N⁺, stanowiącej podstawę struktury mesa, przez którą oświetlany jest przyrząd (rys. 1);
- dobre i szybkie zbieranie nośników generowanych optycznie;
- minimalizację impedancji pasożytniczych w bazie struktury mesa, w szerokoprzerwowych obszarach kontaktowych oraz stykach heterostruktury z metalizacją kontaktową.

Możliwości analitycznego modelowania heterostruktur HgCdTe tego typu i struktur pochodnych są bardzo ograniczone. W szczególności pozwalają one określić przybliżony kształt charakterystyki widmowej oraz graniczne wartości natężenia prądu ciemnego obliczone przy założeniu generacji nośników tylko w trzech głównych warstwach. Poniżej przedstawiono główne zalecenia odnośnie optymalizacji warstw głównych – doboru ich składu, domieszkowania i grubości.

Warstwy N⁺

Warstwa N⁺ stanowi podstawę struktur mesa i górną warstwę kontaktową ze względu na niską rezystywność i łatwość wytworzenia niskorezystancyjnych kontaktów z metalizacją. Jest ona maksymalnie domieszkowana donorami do granic określonych technologicznie, co jest uwarunkowane dążeniem do osiągnięcia niskiej rezystancji szeregowej. Silne domieszkowanie sprawia, że warstwa ta jest nieaktywna fotoelektrycznie ze względu na małą długość drogi dyfuzji spowodowaną niską ruchliwością nośników mniejszościowych (dziur) i stosunkowo krótkim czasem życia. Pełni ona rolę okna dla promieniowania podczerwonego, dla którego stanowi filtr górnoprzepustowy w skali długości fal, określony przez jej przerwę energetyczną i przesunięcie krawędzi absorpcji wskutek efektu Bursteina-Mossa. Jej skład zwykle jest dobierany tak, aby

uzyskać pożądaną krótkofalową granicę spektralnej czułości. Grubość warstwy N^+ może być zmieniana w szerokich granicach bez istotnego wpływu na parametry fotodiod; ze względów praktycznych (tolerancja szybkości trawienia, czas wzrostu MOVPE) warstwy stanowiącej podstawę struktur mesa wynosi 5 do 10 μm a górnej warstwy kontaktowej około 3 μm .

Absorber

Jest wykonywany z wąskoprzerwowego materiału typu v dla zakresu bardziej krótkofalowego i p dla zakresu bardziej długofalowego, o składzie zależnym od żądanej długofalowej granicy czułości, tak aby jego przerwa energetyczna była bliska energii fotonów. Brak lub umiarkowane domieszkowanie typu p pozwala zmniejszyć szybkość generacji termicznej. Optymalny poziom domieszkowania absorbera jest zależny od temperatury pracy i długofalowej granicy czułości. Najczęściej domieszkowanie jest dobierane tak, aby uzyskać maksymalną wykrywalność przy danej długości fali. Grubość absorbera najczęściej jest bliska $0.63/\alpha$, gdzie α jest współczynnikiem absorpcji. Inaczej jest (np. detekcja długofalowego promieniowania w temperaturze bliskiej pokojowej), kiedy długość drogi dyfuzji nośników jest znacznie mniejsza od głębokości absorpcji promieniowania. Optymalne grubości absorbera są wtedy mniejsze od $0.63/\alpha$ i ich określenie wymaga symulacji numerycznej.

Warstwa P^+

Warstwa P^+ stanowi kontakt dla dziur i barierę dla elektronów. Szerokość przerwy energetycznej powinna być istotnie większa od szerokości przerwy energetycznej absorbera a domieszkowanie maksymalnie duże dla zapewnienia dobrych właściwości ekskluzyjnych i niskiej rezystancji szeregowej. Obliczenia wskazują, że optymalny poziom domieszkowania przekracza 10^{18} cm^{-3} . Praktycznym ograniczeniem składu i domieszkowania są jednak względy technologiczne; uzyskanie tak silnego domieszkowania jest trudne dla dowolnego składu. Materiał o zawartości $\text{CdTe} > 0.45$ źle się domieszkuje arsenem i ma niską jakość krystalograficzną. Biorąc pod uwagę praktyczne ograniczenia domieszkowania (do $\sim 2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$), grubość warstwy P^+ powinna wynosić od 1 do 3 μm .

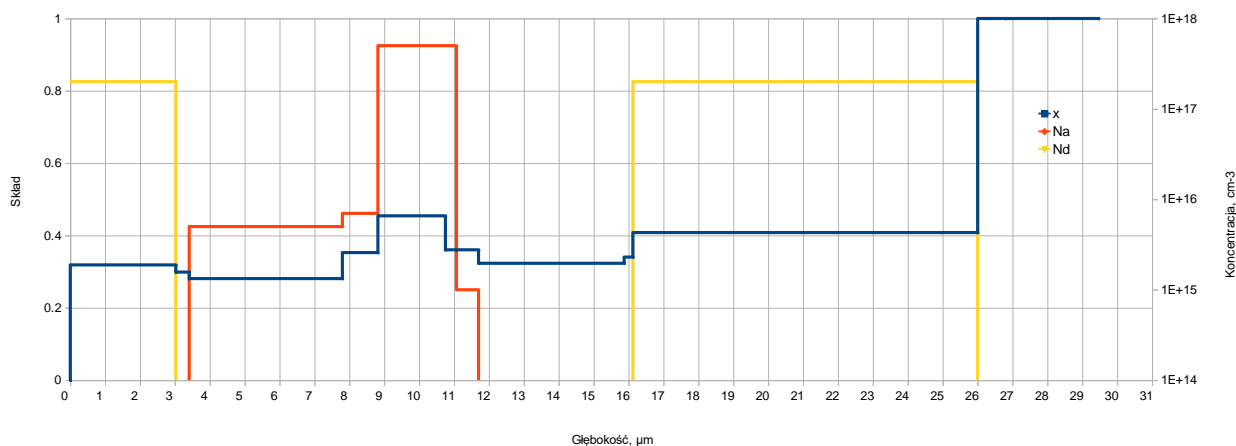
Pełna analiza właściwości fotoelektrycznych złożonych heterostruktur i optymalizacja ich konstrukcji nie jest możliwa za pomocą modelowania analitycznego. Eksperymentalna optymalizacja jest natomiast bardzo kosztowna i czasochłonna. Nieocenionym narzędziem dla rozwoju przyrządów fotoelektrycznych opartych o złożone heterostrukтуры półprzewodnikowe stały się numeryczne symulacje komputerowe. Obecnie dostępnych jest kilka komercyjnych pakietów symulacyjnych, które mogą być użyte w badaniach detektorów wysokotemperaturowych. Jednym z nich jest pakiet APSYS kanadyjskiej firmy Crosslight, stosowany w niniejszym projekcie i uzupełniony o własną bibliotekę parametrów materiałowych. APSYS jest pakietem symulacyjnym 2 D/3 D, który rozwiązuje nie tylko równanie Poissona, ale także równania ciągłości z uwzględnieniem zależności ruchliwości od pola elektrycznego, powielania lawinowego, transportu ciepła, parametrów materiałowych zależnych od temperatury, zjawisk optycznych (pochłaniania, odbicia, interferencji) i innych czynników. Posiada interfejs graficzny umożliwiający wygodne wprowadzanie danych charakteryzujących złożone heterostrukтуры i automatyczny wybór siatki.

Fundamentem technologii fotodiod jest epitaksja heterostruktur HgCdTe metodą epitaksji ze związków metaloorganicznych - MOCVD (Rys. 2.). Metoda ta okazała się szczególnie przydatna do wzrostu wielowarstwowych heterostruktur o ostrej, nierozmytej granicy pomiędzy kolejnymi warstwami. Do wzrostu heterostruktur wykorzystywano technikę interdyfuzyjną (IMP – *Interdiffused Multilayer Process*). Ten sposób osadzania warstw polega na naprzemiennym wzroście par nanometrowych warstewek HgTe i CdTe, które dzięki interdyfuzji tworzą materiał $Hg_{1-x}Cd_xTe$ o wysokiej jednorodności i powtarzalności składu x i o kontrolowanym domieszkowaniu. Parametry wzrostu każdej z warstewek były oddzielnie dobierane. Skład warstwy HgCdTe jest łatwo sterowany przez dobór czasu osadzania warstewek CdTe i HgTe. Jako podłoże zastosowano GaAs. Bezpośrednio na podłożu GaAs następuje najpierw wzrost warstwy buforowej CdTe a następnie proces wzrostu heterostruktur. Proces wzrostu obejmuje wytworzenie wszystkich warstw w jednym procesie *in situ*: buforów, silnie domieszkowanych obszarów kontaktowych, obszarów aktywnych (absorbera), pomocniczych warstw elementu aktywnego oraz warstw spełniających funkcje optyczne. W tym samym procesie wykonywane są dodatkowo wygrzewania interdyfuzyjne (celem wyrównywania składu warstw wytworzonych w procesie IMP) aktywizujące domieszki i poprawiające stechiometrię (anihilacja luk w podsięci metalu). Opracowana technologia uwzględnia postulat maksymalnej integracji procesu epitaksjalnego wzrostu i *processing'u*. W czasie wzrostu warstw w MOCVD wykorzystywano reflektometr. Pomiary odbicia *in situ* umożliwiają obserwację zmian związanych z osadzaniem, chropowaceniem i interdyfuzją w czasie wszystkich etapów osadzania warstw CdTe/HgCdTe. Umożliwia to osadzenie wszystkich warstw w heterostrukturach diod (oprócz absorbera), bez przedwzrostowych kalibracji. Monitorowanie chropowatości warstw podczas osadzania ułatwia identyfikację parametrów decydujących o szybkości chropowacenia, co zdecydowanie ułatwia badania nad poprawą gładkości warstw. Wykorzystanie reflektometru z odpowiednim oprogramowaniem radykalnie ułatwia rozwiązywanie problemów z epitaksją, zwiększa zrozumienie zjawisk zachodzących podczas epitaksji oraz przyczynia się do poprawy uzysku heterostruktur.

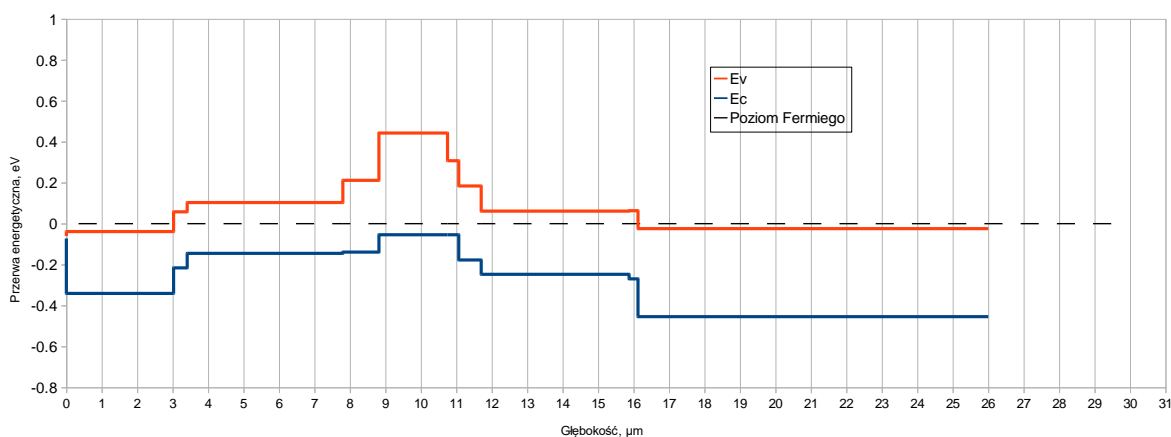


Rys. 2. Fragment linii MOCVD AIX 200 firmy Aixtron wykorzystywanej w projekcie.

Na rys. 3 przedstawiono projekt nominalnego (projektowany do wzrostu metodą MOCVD, czyli pokazujący jak by wyglądała warstwa gdyby nie było interdyfuzji) profilu składu i domieszkowania warstwy HgCdTe z heterostrukturą dla detektora dwubarwnego. Jest to struktura detektora dwubarwnego optymalizowana do pracy w 230 K dla 4 μm i dla 5 μm . Na rys. 4 przedstawiono wyliczony profil przerwy energetycznej dla $T = 230\text{K}$ tej warstwy. Poniżej przedstawiono wyniki badań struktur detekcyjnych uzyskanych z warstwy wykonanej według tego projektu.



Rys. 3. Nominalny profil składu i domieszkowania warstwy HgCdTe z heterostrukturą dla detektora dwubarwnego.



Rys. 4. Wyliczony profil przerwy energetycznej dla $T = 230\text{K}$ zaprojektowanej heterostruktury HgCdTe.

Otrzymywane heterostruktury HgCdTe były poddawane wszechstronnej charakteryzacji, która obejmowała:

- Mikroskopię optyczną z kontrastem Nomarskiego (Rys. 5).
- Wysokorozdzielczą profilometrię optyczną z pomiarem chropowatości.
- Mapowanie składu za pomocą spektroskopii absorpcyjnej w podczerwieni.
- Pomiary wgłębnych profilów składu i domieszkowania metodą SIMS.
- Pomiary efektu Halla.
- Wytwarzanie i charakteryzacja detektorów próbnych.



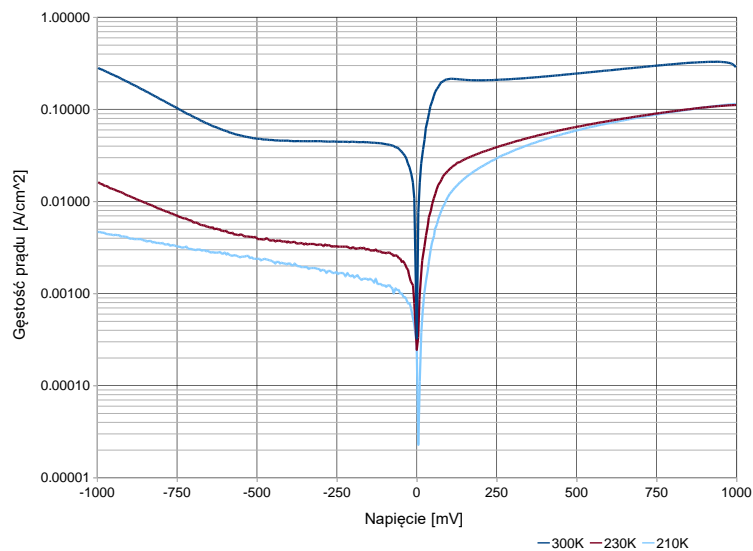
Rys. 5. Zdjęcie warstwy HgCdTe o orientacji (111) (mikroskop z kontrastem Nomarskiego).

Otrzymywanie elementów fotoczułych, czyli wytwarzanie czipu fotodiody jest następnym etapem wytwarzania detektorów. Plaster uzyskany w MOCVD lub jego fragmenty zakwalifikowane do dalszego wykorzystania są poddawane procesom mającym na celu wytworzenie czipów z elementem aktywnym, którym jest struktura mesa z heterostrukturą detektora dwubarwnego. Obejmuje on następujące procesy:

- Fragmentacja plastra.
- Usunięcie warstwy powierzchniowej.
- Wytrawienie znaczników.
- Wytrawienie struktury mesa.
- Naniesienie warstwy pasywującej CdTe.
- Usunięcie pasywacji w oknach na wierzchołkach struktur mesa.
- Usunięcie pasywacji w oknach na powierzchni N+.
- Naniesienie ścieżek metalowych (metalizacja kontaktowa).
- Fragmentacja płytek na kostki z elementami aktywnymi.
- Charakteryzacja kostek.
- Charakteryzacja czipów.

Przewidziano także możliwość wytworzenia soczewek immersyjnych bezpośrednio z podłoża GaAs, czyli zastosowania monolitycznej immersji optycznej.

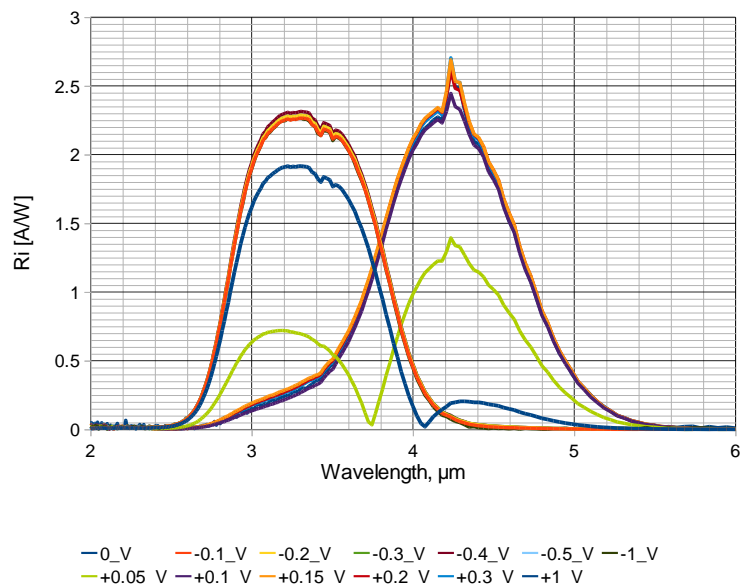
Na rys. 6 pokazane są charakterystyki prądowo napięciowe struktury detekcyjnej dla detektora dwubarwnego zmierzone w temperaturach 300 K (bez chłodzenia) w 230 K (chłodzenie dwustopniową chłodziarką termoelektryczną - 2TE) i w 210 K (chłodzenie trójstopniową chłodziarką termoelektryczną - 3TE).



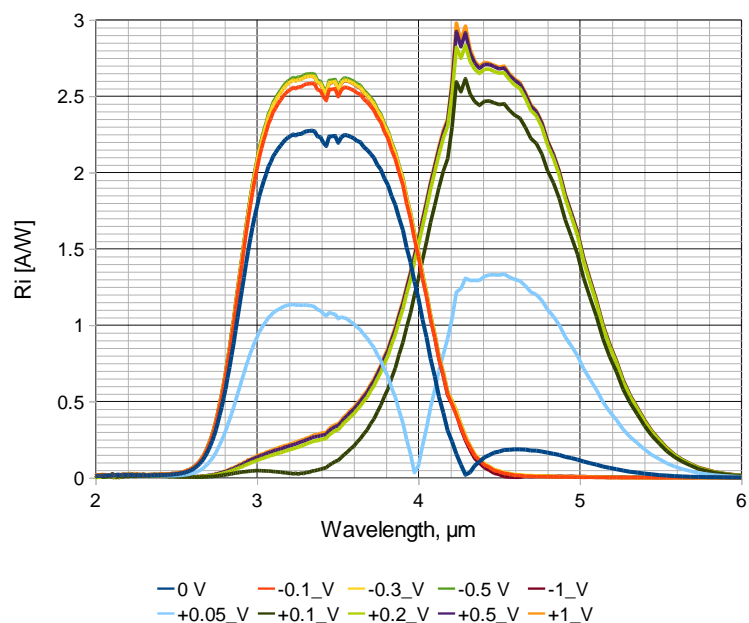
Rys. 6. Charakterystyki prądowo napięciowe struktury detekcyjnej dla detektora dwubarwnego zmierzone w temperaturach 300 K (bez chłodzenia) w 230 K (2TE) i w 210 K (3TE).

Charakterystyki prądowo-napięciowe fotodiod wykazują dobre nasycenie prądu ciemnego dla napięć wstecznych dochodzących do 0,5 V w różnych temperaturach pracy. Przy wyższych napięciach następuje wyraźny wzrost prądu ciemnego.

Rys. 7 przedstawia wyniki pomiarów czułości prądowej tej struktury detektora dwubarwnego w $T = 300K$ dla różnych napięć zasilania od -1 V do +1 V, a rys. 8 przedstawia wyniki pomiarów czułości prądowej tej struktury w $T = 230K$ także dla różnych napięć zasilania od -1 V do +1 V. Potwierdzają one fakt przełączania zakresu widmowego sygnału wraz ze zmianą polaryzacji napięcia na strukturze diodowej. Obszar P^+ stanowi dobrą barierę potencjału rozdzielającą nośniki z obszarów krótkofalowego i długofalowego, tak że przesłuchy elektryczne pomiędzy złączami są niewielkie.

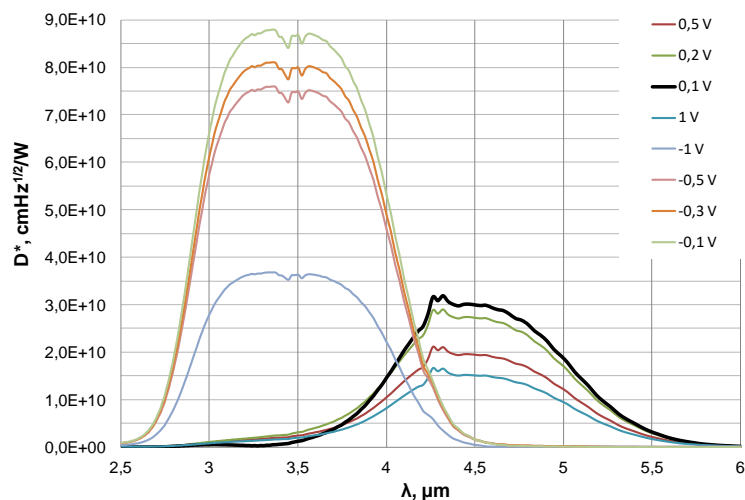


Rys. 7. Wyniki pomiarów czułości prądowej struktury detekcyjnej detektora dwubarwnego w $T = 300K$ dla różnych napięć zasilania od -1 V do +1 V.



Rys. 8. Wyniki pomiarów czułości prądowej struktury detekcyjnej detektora dwubarwnego w $T = 230\text{K}$ dla różnych napięć zasilania od -1 V do $+1\text{ V}$.

Rys. 9 przedstawia wyniki pomiarów wykrywalności tej struktury detektora dwubarwnego bez immersji optycznej w $T = 230\text{K}$ dla różnych napięć zasilania od -1 V do $+1\text{ V}$. Przy zastosowaniu monolitycznej immersji optycznej (soczewka wykonana z podłoża GaAs) wykrywalność wzrośnie o około 10 razy. Zapewni to osiągnięcie warunków pracy BLIP.



Rys. 9. Wyniki pomiarów D^* struktury detekcyjnej detektora dwubarwnego bez immersji optycznej w $T = 230\text{K}$ dla różnych napięć zasilania od -1 V do $+1\text{ V}$.