

Zastosowanie warstw (Cd, Hg) Te do konstrukcji mozaik detektorów fotoprzewodzących

WSTĘP

Tellurek kadmowo-ręciowy jest jednym z najważniejszych materiałów stosowanych do konstrukcji półprzewodnikowych detektorów podczerwieni różnych typów. Pierwotnie detektory na /Cd, Hg/Te, podobnie jak i na innych materiałach, wykonywano jedynie w postaci dyskretnych pojedynczych elementów fotoczułych. Nowe możliwości stwarza wykorzystanie detektorów wieloelementowych zwanych mozaikami.

Mozaiki detektorów umożliwiają dokonywanie równoczesnej analizy rozkładu przestrzennego mocy promieniowania, a także innych jego charakterystyk. Zapotrzebowanie na mozaiki znacznie wzrosło wraz z pojawieniem się urządzeń zobrazujących /zobrazowanie termalne, wizualizacja promieniowań/.

Analiza przestrzennego rozkładu mocy promieniowania może być wprowadzić wykonana przy użyciu detektora pojedynczego i mechanicznego przeszukiwania, jednakże rozwiązanie to wymaga stosowania skomplikowanych konstrukcyjnie urządzeń.

Przy zastosowaniu dwuwymiarowej mozaiki pełna analiza obrazu może być wykonana bez przeszukiwania mechanicznego. W tym przypadku łatwo jest otrzymać dużą szybkość analizy, zmniejszone są wymagania stawiane detektorom i układowi elektronicznemu. W celu otrzymania dobrej rozdzielczości przestrzennej rozwiązanie to wymaga stosowania bardzo dużej ilości elementów i torów wzmacniających. Kompromisowym – i w wielu wypadkach optymalnym – rozwiązaniem jest stosowanie układu hybrydowego wykorzystującego mozaikę liniową i jednokierunkowe przeszukiwanie mechaniczne. Rozwiązanie to wymaga jedynie użycia stosunkowo prostego układu mechanicznego i elektronicznego.

Mozaiki mogą być wykorzystane przez składowanie z uprzednio wytworzonych elementów dyskretnych lub bezpośrednio wytworzenie zintegrowanej struktury mozaikowej.

Zaletą pierwszej metody jest możliwość wstępnej selekcji i użycie jedynie elementów o wysokiej jakości, wadą – wysokie koszty wytwarzania i trudności otrzymania mozaik składających się z elementów o małych wymiarach.

Druga z kolei metoda jest znacznie tańsza, umożliwia otrzymywanie struktur składających się z dużej liczby małych elementów, wymaga jednak stosowania zaawansowanych metod technologicznych. Niemożliwość selekcji elementów powoduje duży procent braków.

Do otrzymywania mozaik – szczególnie w przypadku metody drugiej – konieczny jest materiał półprzewodnikowy o odpowiednich własnościach i dużej jednorodności /w kie-

runku równoległym do powierzchni/. Wymagana jest wysoka jednorodność wartości przerwy energetycznej, domieszkowania, czasu życia. Parametry te decydują o podstawowych własnościach elementów fotoczułych mozaiki - kształcie charakterystyki widmowej, czułości i wykrywalności znormalizowanej.

Tellurek kadmowo-rtęciowy w dotychczasowym stadium rozwoju technologii - jest materiałem trudnym do otrzymywania. Otrzymuje się go zwykle przez krystalizację z fazy ciekłej. Duży współczynnik segregacji w układzie CdTe - HgTe powodował, że otrzymywano materiał o dużych gradientach składu w każdym kierunku. Nawet po zastosowaniu specjalnych metod ujednorodnienia składu, gradienty składu wynoszą zwykle około $3 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$ [1]. W materiale tym obserwuje się także występowanie dużych niejednorodności domieszkowania i czasu życia. Wszystko to powodowało, że dotychczas otrzymano mozaiki z /Cd,Hg/Te zwykle metodą składania z niewielkiej liczby elementów dyskretnych.

W detektorach mozaikowych najczęściej wykorzystuje się zjawisko fotoprzewodnictwa. W tym zastosowaniu materiał półprzewodnikowy powinien mieć kształt cienkiej płytki o grubości ok. $10 \mu\text{m}$ i dużej powierzchni/kilkaset mm^2 /. Materiał w takiej postaci najłatwiej wykonać techniką cienkowarstwową.

Najczęściej stosowane metody otrzymywania cienkich warstw zawodzą w przypadku /Cd,Hg/Te; otrzymuje się warstwy o złych własnościach fotoelektrycznych.

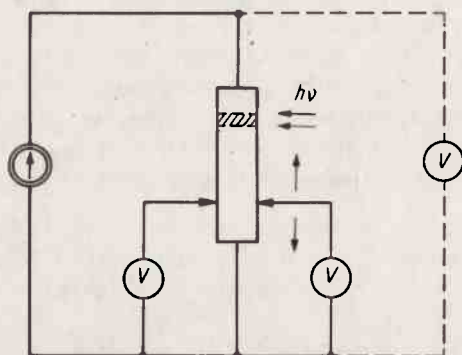
W latach 1962-1976 rozwinięto metodę izotermicznego osadzania HgTe na krystaliczny CdTe [2-4]. Metodę tę dostosowano do konstrukcji detektorów fotoprzewodzących [4-6]. Powstała także nowa metoda otrzymywania warstw jednorodnych /Cd,Hg/Te [4,7]. Celem pracy jest określenie przydatności tych metod do konstrukcji mozaikowych detektorów fotoprzewodzących.

2. METODY DOSWIADCZALNE I POMIAROWE

Struktury z gradientem składu /Cd,Hg/Te i jednorodne warstwy na heteropodłożach otrzymywano przez izotermiczne osadzenie HgTe na litym krystalicznym tellurku kadmowym lub uprzednio naporowanych termicznie cienkich warstwach CdTe. Metody te zostały szczegółowo opisane w pracach [4-7]. Do pomiarów jednorodności wykorzystano głównie materiał przygotowany do konstrukcji nie chłodzonych defektorów zakresu $3 \div 5,5 \mu\text{m}$. Warunki osadzania w obydwu metodach były następujące: temperatura -823 K , czas - 24 h, ciśnienie par rtęci $-9,8 \cdot 10^4 \text{ Nm}^{-2}$.

Całkowita grubość struktury z gradientem składu /po częściowym strawieniu powierzchni/ wynosi około $30 \mu\text{m}$.

Podłożem warstw jednorodnych była najczęściej mika, a grubości warstw - około $10 \mu\text{m}$. Zarówno struktury z gradientem składu, jak i jednorodne warstwy /Cd,Hg/Te, poddawano obróbce termicznej w parach rtęci w celu otrzymania niskiej koncentracji nośników. Otrzymane w ten sposób próbki poddawano pomiarom. Pomiar absorpcji $2 \div 20 \mu\text{m}$ wykonywano przy użyciu spektrofotometrów UR-10 i SPECORD-IR. Do pomiarów wykorzystywano struktury z gradientem składu w postaci okrągłych płytek / $\phi \approx 10 \text{ mm}$ / i prostokątne warstwy jednorodne / $10 \times 40 \text{ mm}^2$ / osadzone na mice. Próbkę sondowano plamką świetlną o średnicy 3 mm .



Rys.1. Schemat układu do pomiaru przewodnictwa elektrycznego i fotoprzewodnictwa

Rysunek 1 pokazuje schemat układu do pomiarów przewodnictwa elektrycznego i fotoprzewodnictwa. W tych pomiarach wykorzystano próbki w postaci wydłużonych prostokątów o stosunku długości do szerokości - powyżej 4.

Zastosowanie ruchomych ostrzowych kontaktów umożliwia pomiar rozkładu przewodnictwa elektrycznego wzdłuż próbki. Podobnie zastosowanie ruchomej plamki świetlnej umożliwia pomiar rozkładu fotoprzewodnictwa. Pomiarów charakterystyk fotoprzewodnictwa stacjonarnego pozwalają na określenie wartości efektywnego czasu życia.

Wyliczenia wartości czasu życia wykonywano według metodyki opisanej w pracy [8]. W wyliczeniach przyjęto wartość wydajności kwantowej równą 0,7.

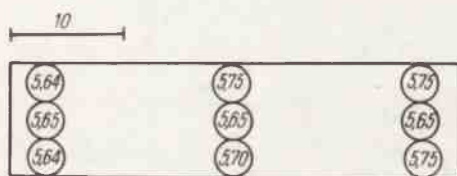
3. WYNIKI BADAŃ

3.1. Jednorodność składu

Rysunek 2 przedstawia wyniki badań rozkładu krawędzi absorpcji dla jednorodnej warstwy /Cd,Hg/Te. Za krawędź absorpcji przyjęto długość fali, przy której transmisja warstwy osiąga połowę wartości maksymalnej.

Jak wykazuje rysunek, warstwa charakteryzuje się wysoką jednorodnością krawędzi absorpcji. Maksymalna i minimalna wartość wynoszą odpowiednio: 5,64 i 5,75 μm na płytce o wymiarach 10 x 40 mm. W przeliczeniu na gradient składu według zależności z pracy [9], odpowiada to gradientowi składu około 10^{-4} mm^{-1} . Jest to wartość znacznie mniejsza od najlepszych wyników otrzymywanych przy użyciu litych kryształów /Cd,Hg/Te. Tak wysoka jednorodność składu jest osiągana mimo asymetrycznej konfiguracji układu źródło - podłoże [7], w czasie procesu osadzania warstwy. Jest to wynikiem termodynamicznych charakterystyk procesu osadzania w warunkach izotermicznych prowadzących do pełnego wyrównania składu.

Równocześnie skład warstwy z dobrą dokładnością $|\Delta x| < 0,005$ odpowiada założonej wartości. Nieco większe gradienty składu występowały jedynie w przypadku niepełnego osadzania HgTe. Stwierdzono także, że wyniki pomiarów krawędzi fotoprzewodnictwa



Rys.2. Rozkład krawędzi absorpcji wzdłuż warstwy /Cd, Hg/Te

dobrze odpowiadają wynikom pomiarów optycznych. W przypadku struktur z gradientem składu stwierdzono występowanie zwykle niewielkich gradientów składu wzdłuż powierzchni próbek. Na płytkach o średnicy około 10 mm skład zmieniał się np. w zakresie $0,273 \div 0,281$. Wzdłużne gradienty składu rosły wraz ze zwiększeniem zawartości CdTe i zmniejszeniem grubości struktury. Te gradienty składu są spowodowane prawdopodobnie asymetrią układu źródło - podłoże w czasie osadzania. Nieco większa wartość gradientu składu spowodowana jest faktem, że przy otrzymywaniu struktur z gradientem składu proces osadzania jest przerywany przed osiągnięciem równowagi termodynamicznej układu. Tym niemniej wzdłużne gradienty składu decydujące o rozrzucie krawędzi fotoczułości detektorów w mozaice, są w przypadku struktur z gradientem składu niższe niż osiągnięte zwykle w litych kryształach /Cd, Hg/Te.

Struktury z gradientem składu stawia się od strony bogatej w HgTe, celem korekty krawędzi fotoczułości. Stwierdzono, że trawienie to prowadzi do powstania znacznych wzdłużnych gradientów składu, co jest wynikiem nierównomierności trawienia. Brzegi struktur są szybciej trawione. Sposób trawienia decydująco wpływa na wzdłużne gradienty składu.

Dobre wyniki daje stosowanie obróbki mechaniczno-chemicznej przez polerowanie na tkaninach nasączonych roztworem bromu w metanolu.

3.2. Jednorodność domieszkowania i czasu życia

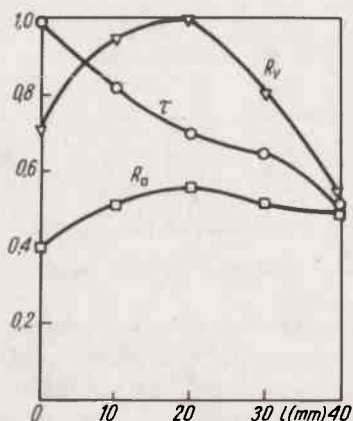
Rysunek 3 pokazuje zmiany rezystywności powierzchniowej wzdłuż warstwy /Cd, Hg/Te. Obserwuje się zmiany rezystywności rzędu 30% na odległości 40 mm. Pomiar wykonano przy użyciu próbek o grubości około $20 \mu\text{m}$, zawartości CdTe około 0,28 i średniej koncentracji nośników około $5 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-3}$. W niektórych próbkach obserwowano jednak występowanie większych gradientów domieszkowania.

Równocześnie pomiary przeprowadzone w niskich temperaturach wykazały możliwość otrzymania warstw o koncentracji aktywnych elektrycznie domieszek poniżej

$5 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$. Stosunkowo znaczny rozrzut rezystywności materiału jest wynikiem wprowadzania domieszek na różnych etapach procesów technologicznych [4,7,8].

Pomiary przeprowadzone na strukturach z gradientem składu wskazały na istnienie gradientów domieszkowania, podobnych jak w przypadku warstw jednorodnych. W części struktur z gradientem składu otrzymano jednak mniejsze wartości koncentracji domieszek $/n = 2 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$ w temperaturze 77 K przy zawartości CdTe około 0,26/.

Na rysunku 3 pokazano także rozkład wartości czasu życia. Pomiar dokonano na jedno-



Rys. 3. Rozkłady rezystywności powierzchniowej, czułości napięciowej i czasu życia wzdłuż próbki

rodnych warstwach /Cd,Hg/Te o grubości $20 \mu\text{m}$, zawartości CdTe około 0,28 i średnim czasie życia około $1,8 \mu\text{s}$. Jak wskazuje rys. 3, obserwuje się zmiany czasu życia do około 50% wartości maksymalnej.

Przytoczone rezultaty dotyczą materiałów przeznaczonych do konstrukcji niechłodzonych detektorów okna $3,5 \div 5,5 \mu\text{m}$, jednakże nasze pomiary, wykonane na dyskretnych detektorach, wykazały także możliwość otrzymywania dobrych materiałów na inne zakresy widmowe.

W szczególności otrzymywaliśmy także warstwy jednorodne i struktury z gradientem składu na ważny zakres okna $8 \div 14 \mu\text{m}$. Otrzymano w tym przypadku w detektorach z $\bar{\lambda}_{co} = 10,6 \mu\text{m}$ pracujących w temperaturze ciekłego azotu, czasu życia około 3 i $1 \mu\text{s}$, odpowiednio dla struktur z gradientem składu i warstw jednorodnych.

PODSUMOWANIE

Metody izotermicznego osadzania HgTe na krystalicznych płytkach lub cienkich warstwach CdTe pozwalają na otrzymywanie struktur warstwowych o dużych powierzchniach i wysokiej jednorodności składu wzdłuż powierzchni.

Jednorodność składu /zwłaszcza w przypadku warstw jednorodnych w głąb/ jest znacznie wyższa niż w /Cd,Hg/Te otrzymywanym jakąkolwiek inną metodą. Pomiary fotoelektryczne równocześnie wykazały możliwość otrzymania materiałów o stosunkowo wysokich wartościach czasu życia. Umożliwia to ich wykorzystanie do konstrukcji wieloelementowych detektorów mozaikowych. Wskazane jest jednak przeprowadzenie dalszych prac technologicznych nad poprawą jednorodności parametrów domieszkowych /koncentracji nośników i czasu życia/.

Literatura

1. Long D., Schmit J.L.: *Semiconductors and Semimetals* t.5 s. 183, 1970
2. Bailly F.: *Compt. Rend* 257, 103, 1970
3. Tuft O.N., Stelzer E.L.: *J.Appl. Phys* 40, 4559, 1968
4. Piotrowski J.: *Praca doktorska, Warszawa, WAT* 1973
5. Igras E., Piotrowski J., Persak T., Nowak Z.: *Proc. 6-th, Int.Symp. IMEKO on Photon Detectors, Siofok* 221, 1974
6. Galus W., Persak T., Piotrowski J.: *Biuletyn WAT*, 12, 93, 1975
7. Piotrowski J.: *Elektron Technology*, 5, 87, 1972
8. Piotrowski J.: *Zastosowania /Cd, Hg/Te do konstrukcji detektorów promieniowania elektromagnetycznego, Biuletyn WAT, Warszawa /w przygotowaniu/*
9. Schmit J.L., Stelzer E.L.: *J.Appl. Phys* 40, 4865, 1969