

Opinia

o rozprawie doktorskiej mgr inż. Jana Sobieskiego

Rozprawa doktorska mgr inż. Jana Sobieskiego zatytułowana „*Optymalizacja heterostruktury półprzewodnikowej fotodiody z HgCdTe otrzymanej metodą MOCVD o wysokiej wykrywalności i pracującej bez chłodzenia kriogenicznego w zakresie spektralnym od $2\mu\text{m}$ do $3.5\mu\text{m}$* ” wydrukowana została w Wojskowej Akademii Technicznej. Rozprawa liczy 118 stron i posiada listę bibliograficzną liczącą 61 pozycji. Rozprawa składa się ze wstępu i czterech części.

We wstępie doktorant omawia zasadnicze zastosowania fotoprzewodzących i fotowoltaicznych detektorów HgCdTe w różnych dziedzinach, podkreślając, że zasadnicze zastosowania fotodetektorów pracujących w zakresie $2\mu\text{m}$ – $3.5\mu\text{m}$ leży w analizie spektralnej gazów. We wstępie przedstawiona jest główna motywacja rozprawy, którą było wysokotemperaturowe wygrzewanie powzrostowe ujednorodniające skład warstw epitaksjalnych HgCdTe prowadzące do poprawy parametrów detektorów.

W pierwszej części rozprawy doktorant przedstawia podstawowe własności materiałów HgCdTe, takie jak struktura pasmowa tego materiału i jej zależność od składu. Następnym zagadnieniem omawianym w rozdziale 1 jest współczynnik absorpcji, który w pobliżu przerwy energetycznej ma charakter eksponenty. Przy omawianiu tego zagadnienia doktorant przedstawia literaturowe wyniki wpływu składu Hg i temperatury na kształt współczynnika absorpcji. W dalszej części rozdziału 1 doktorant omawia koncentracje samoistną, masy efektywne i ruchliwości nośników w HgCdTe. Następnym zagadnieniem szeroko omówionym w tym rozdziale jest generacja termiczna i stosunek sygnału do szumu oraz podstawowe parametry fotonowych detektorów podczerwieni. Doktorant podkreśla, że znajomość czułości i szumu detektora jest istotna dla ważnego parametru detektora jakim jest wartość mocy promieniowania padającej na detektor i dający sygnał napięciowy o wartości równej poziomowi szumów, tzw. NEP (NoiseEquivalent Power) lub tzw. wykrywalność znormalizowana D^* (SpecificDetectivity).

Ostatnim zagadnieniem omawianym w Rozdziale 1 jest zastosowanie heterostruktur HgCdTe w detekcji promieniowania podczerwonego. Doktorant zwraca uwagę na znaczenie fotodiod heterozłączowych, które mają przewagę nad fotorezystorami wynikającą z niższego poziomu szumów.

Rozdział 2 poświęcony jest opisowi wzrostu warstw metodą MOCVD. Doktorant opisuje typowe urządzenie do wzrostu MOCVD stwierdzając, że metoda ta ma szczególne znaczenie dla produkcji przemysłowej. W następnej części rozdziału 2 doktorant opisuje termodynamikę wzrostu MOCVD podkreślając, że związek HgTe jest mniej stabilny niż CdTe, co ma istotne znaczenie przy wzroście warstw HgCdTe. Wzrost HgCdTe wymaga wysokiego ciśnienia par rtęci, która utrzymuje równowagę pomiędzy fazą stałą i gazową. Z drugiej strony różnica energii wiązań pomiędzy CdTe i HgTe wymaga przy wzroście HgCdTe nadmiaru telluru. W dalszej części rozdziału 2 doktorant bardzo szczegółowo omawia wzrost MOCVD warstw HgCdTe wykazując głębokie zrozumienie procesów zachodzących przy tym wzroście. W szczególności omawia metodę naprzemiennego osadzania wzrostu warstw HgTe i CdTe, która została zaimplementowana w VIGO-WAT.

W następnym podrozdziale doktorant dyskutuje domieszkowanie warstw HgCdTe. Doktorant stwierdza, że efektywne domieszkowanie donorami jak i akceptorami występuje w podsieci telluru ze względu na niedomiar telluru. W przypadku donorów jest to jod, a akceptorów arsen.

Rozdział 3 dotyczy opisu optymalizacji wygrzewania warstw HgCdTe. Jest to bardzo istotny proces, gdyż prowadzi on do interdyfuzji w niejednorodnym stopie HgCdTe, w rezultacie którego następuje homogenizacja materiału. Rezultaty wygrzewania ilustrowane są wynikami SIMS pokazującymi powstającą homogenizację warstw HgCdTe. Doktorant na ich podstawie stwierdza, że najskuteczniejsza temperatura poprawy jednorodności występuje około 400°C. W części rozdziału 3.5 przedstawia swoje wyniki optymalizacji wygrzewania warstw HgCdTe, pokazując, że wygrzewanie w 400°C powoduje wzrost ruchliwości nośników, oraz wzrost czułości prądowej. Doktorant stwierdza, że optymalny czas wygrzewania w 400°C wynosi około 30 minut. Stwierdza też, że wzrost czułości prądowej wynika ze wzrostu ruchliwości elektronów i wzrostu czasu życia nośników mniejszościowych.

W podrozdziale 3.6 doktorant analizuje wpływ wygrzewania na parametry materiału HgCdTe. Po przez analizę parametrów Hall'a stwierdza, że wygrzewanie w optymalnych warunkach prowadzi do redukcji domieszkowania tła i wzrostu ruchliwości. W dalszej części podrozdziału 3.6 doktorant dyskutuje wpływ wygrzewania na procesy rekombinacji, a przez

to na czasy życia nośników mniejszościowych. W podrozdziale 3.7 doktorant przedstawia wyniki pomiarów magneto-transportu i analizę widm ruchliwości. W podrozdziale 3.8 przedstawione są wyniki fotoluminescencji, a ich analiza w przekonujący sposób stwierdza, że za fotoluminescencję warstw HgCdTe odpowiadają przejścia elektronów z pasma przewodnictwa na poziom akceptorowy arsenu.

Rozdział 4 poświęcony jest wpływowi optymalnego wygrzewania na parametry fotodiod HgCdTe. W podrozdziale 4.1 doktorant omawia architekturę fotodiody wyhodowanej na podłożu GaAs i posiadającej grubą warstwę bufor CdTe. Opisaną heterostrukturę oświetla się od strony podłoża GaAs, a kontakt metaliczny na warstwie n^+ jest zwierciadłem dla promieniowania. Dzięki temu uzyskuje się dwukrotne przejście promieniowania przez strukturę. W podrozdziale 4.2 omawiana jest optymalna orientacja wzrostu struktur HgCdTe na warstwie buforowej CdTe, którą okazuje się kierunek (111)B.

W podrozdziale 4.3 doktorant omawia zastosowanie wygrzewania na strukturę detektora. Jego dyskusja i zebrane wyniki wpływu wygrzewania na poszczególne elementy struktury detektora dowodzą głębokiego zrozumienia zachodzących tam procesów. W podrozdziale 4.4 doktorant omawia optymalizację warstwy typu n w funkcji jej grubości. W podrozdziale 4.5 doktorant omawia wykonanie i charakterystykę testowej serii detektorów. Stwierdza, że wykonane detektory osiągają znacznie wyższą rezystancję dynamiczną niż inne wytwarzane do tej pory w VIGO. W podrozdziale 4.6 doktorant analizuje mechanizmy generacji prądu ciemnego w funkcji temperatury.

Rozprawę kończy podsumowanie podkreślające, że opracowane przez doktoranta wygrzewanie homogenizujące prowadzi do poprawy jednorodności materiału oraz wzrostu czasu życia nośników mniejszościowych. Następną konsekwencją wygrzewania było obniżenie koncentracji resztkowego domieszkowania oraz wzrost ruchliwości nośników. Najistotniejszym wynikiem uzyskanym przez doktoranta było zastosowanie wygrzewania do konkretnych struktur detektorowych. Otrzymane detektory charakteryzowały się znacznie wyższą wykrywalnością w stosunku do dotychczas produkowanych detektorów w VIGO. W konsekwencji uzyskane detektory nadają się do zastosowania w produkcji detektorów fotowoltaicznych pracujących w zakresie 3.0 – 3.4 μm .

To osiągnięcie kwalifikuje kandydata do nadania mu stopnia naukowego doktora. Oceniam bardzo pozytywnie przedstawioną mi do recenzji pracę doktorską.

Niemniej do obowiązków recenzenta należy wykazanie niedociągnięć i pewnych braków jakie mają miejsce w rozprawie doktorskiej. Mój podstawowy zarzut dotyczy

stronybibliograficznej pracy – liczba cytowanych referencji 61 wydaje się zbyt niska na ze względu na bogatą tematykę dotyczącą związków HgCdTe, która rozwija się już od blisko 60 lat. Przykładowo praca przeglądowa prof. A. Rogalskiego o detektorach HgCdTe sprzed 20 lat liczy 156 referencji (Rep. Prog. Phys. **68** (2005) 2267–2336.). Dość skromna lista referencji prowadzi do tego, że niektóre cytowania budzą moje zastrzeżenia. Przykładowo, struktura pasmowa HgCdTe przedstawiona na Rys.1.2 jest cytowana za pracą doktorską z 2023 roku. Warto pamiętać, że monokryształy HgCdTe były otrzymywane dość dawno, a struktura pasmowa tego związku była intensywnie badana już 40-50 lat temu. Według mnie należało sięgnąć po cytowanie oryginalnych prac. Sama struktura pasmowa HgCdTe dla $x=0.16$ i $x=0$ w tekście pracy omówiona jest dość pobieżnie, a nawet znajduje się tam błędne stwierdzenie takie jak: „poziom Γ_{86} jest dnem pasma przewodnictwa”. Poprawnie powinno się stwierdzać, że w zależności od x poziom Γ_6 lub Γ_8 jest dnem pasma przewodnictwa.

Mam też zastrzeżenia co do podpisów pod niektórymi rysunkami, które nie posiadają odpowiednich odnośników literaturowych. Przykładowo, podpisy pod rysunkami 1.5, 1.6 i 1.7 pokazującymi zależność współczynników absorpcji od długości fali nie posiadają odpowiednich referencji. Ostatnia uwaga krytyczna dotyczy podawanych przez doktoranta wzorów, które nie mają zdefiniowania oznaczeń parametrów w nich występujących, co utrudnia czytanie pracy.

Te uwagi krytyczne nie umniejszają mojej bardzo pozytywnej opinii o całości pracy. Nie ulega wątpliwości, że doktorant jest znakomicie przygotowany do podjęcia się dowolnie trudnych prac technologicznych. Moja opinia o recenzowanej pracy doktorskiej jest jak najbardziej pozytywna i niniejszym wnioskuje do Rady Wydziału Nowych Technologii i Chemii WAT o nadanie mu stopnia naukowego doktora.

J. Baranowski