

Warszawa, 8 maja 2025

Prof. dr hab. Marek Godlewski
Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk
02-668 Warszawa
Al. Lotników 32/46

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Jana Sobieskiego
zatytułowanej:**

**„Optymalizacja heterostruktury półprzewodnikowej fotodiody z HgCdTe
otrzymanej metodą MOCVD o wysokiej wykrywalności i pracującej bez
chłodzenia kriogenicznego w zakresie spektralnym od 2 μm do 3,5 μm ”**

Wstęp

Praca doktorska mgr inż. Jana Sobieskiego wykonana została w Wojskowej Akademii Technicznej (WAT) im. Jarosława Dąbrowskiego pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Małgorzaty Kopytko (promotorka rozprawy) i dr inż. Waldemara Gawrona (promotor pomocniczy). Jest to kolejna praca doktorska wykonana na tej uczelni w ramach ścisłej współpracy naukowej pomiędzy laboratoriami WAT i firmą Vigo Photonics. **Ta (wysoko oceniana przeze mnie współpraca) ma duże znaczenie na wynik końcowy doktoratu, który w moim odczuciu kończy się znaczącym sukcesem.**

Cele rozprawy

Celem wykonanej pracy doktorskiej była optymalizacja procesu wygrzewania heterostruktur HgCdTe po procesie ich wykonania zmodyfikowaną techniką MOCVD. Badane struktury stosowane są w detektorach podczerwieni pracujących bez chłodzenia kriogenicznego. W badaniach skupiono się na strukturach wykorzystywanych w detektorach (bez chłodzenia kriogenicznego) pracujących dla długości fali 2 - 3,5 μm . Takie detektory produkowane są przez firmę Vigo Photonics. Praca ma tym samym duże znaczenie praktyczne, a jej wyniki mogą być wdrożone przy produkcji nowej generacji detektorów.

Opis rozprawy

Złożona praca doktorska jest obszerna - liczy 118 stron. Część zasadnicza pracy (rozdziały 1-4) poprzedzona jest Streszczeniem i Abstraktem w języku angielskim oraz Wstępem, w którym autor omawia cele doktoratu oraz strukturę rozprawy.

Zasadnicza część pracy składa się z czterech rozdziałów i zakończona jest Podsumowaniem, spisem literatury (Bibliografia, 61 pozycji), Spisem ilustracji i Spisem użytych symboli. Szkoda tylko, że doktorant nie zamieścił informacji o swoim dorobku naukowym. Z załączonego spisu literatury zorientowałem się, że taki dorobek posiada.

Poniżej nie analizuję w szczegółach zawartości poszczególnych części pracy. Omawiam je krótko podkreślając najważniejsze osiągnięcia doktoratu.

W pierwszym z czterech rozdziałów omówione są właściwości HgCdTe oraz podstawowe parametry detektorów podczerwieni wykonywanych z użyciem tego półprzewodnika. **Jest to bardzo fachowo napisany tekst potwierdzający dużą wiedzę doktoranta w tematyce pracy.**

Rozdział drugi dotyczy wzrostu warstw HgCdTe metodą MOCVD. Struktury wykonane w tej technologii badane były przez doktoranta. To w tej części doktorant pisze krótko o alternatywnych metodach wzrostu odpowiednich warstw, w szczególności o metodzie MBE, która zapewnia odpowiednio niski poziom „domieszkowania resztkowego” i bardzo ostre międzypowierzchnie (interfejsy).

Porównując różne metody wzrostu doktorant wskazuje na zalety użycia metody MOCVD, a następnie szczegółowo opisuje termodynamikę wzrostu warstw HgCdTe z wykorzystaniem tej metody. Dla mnie interesujący był podrozdział 2.3, w którym opisana jest metoda IMP podobna do używanej w moim laboratorium technologii Osadzania Warstw Atomowych (ALD). Jak każda metoda wzrostu i ta ma ograniczenia dyskutowane na stronie 50tej rozprawy.

Kluczowe wyniki doktoratu przedstawione są w dwóch kolejnych rozdziałach. W pierwszym z nich (rozdział trzeci pracy) analizowany jest wpływ procesów wygrzewania na

badane struktury cienkowarstwowe. Cały doktorat oparty jest na prostym pomysle – aby otrzymać struktury o lepszych parametrach i kontrolowanym poziomie zdefektowania zastosowano cykle wygrzewania po procesie wzrostu heterostruktur.

Choć pomysł (cel doktoratu) jest prosty (wygrzewanie homogenizujące warstwy HgCdTe) to nie umniejsza to końcowego sukcesu złożonej pracy doktorskiej. **W wyniku optymalizacji procesu wygrzewania otrzymano znaczącą poprawę parametrów heterostruktur wykorzystywanych przy produkcji detektorów na podczerwień.**

W celu optymalizacji procesu wygrzewania konieczne było dokładne zbadanie procesów interdyfuzji (podrozdział 3.2). Ciekawą obserwacją było stwierdzenie, że dominujący mechanizm interdyfuzji zmienia się w zależności od składu stopu HgCdTe, temperatury wygrzewania i ciśnienia par Hg.

Kluczowe wyniki pokazane są w podrozdziale 3.3, w którym pokazane są wyniki pomiarów SIMS w celu określenia jednorodności badanych struktur. W końcowej części tego rozdziału zebrane są wyniki szczegółowych badań wygrzewanych struktur przeprowadzonych z wykorzystaniem szeregu technik pomiarowych.

Sukces pracy doktorskiej potwierdzają wyniki ,przedstawione w rozdziale czwartym. W tym rozdziale porównane są parametry pracy fotodiod nie wygrzewanych i po cyklu homogenizującego wygrzewania. Rozdział zaczyna się od szczegółowego omówienia struktury badanych diod detekcyjnych, sposobu wykonania kontaktów, etc. Kluczowy wynik pokazany jest na przykład na rysunku 4.11, rysunku potwierdzającym uzyskanie wyższej wykrywalności promieniowania podczerwonego o długości fali z zakresu 2-3,5 μm .

Autor przeprowadza także analizę mechanizmów generacji prądu ciemnego.

Uwagi do pracy

Część merytoryczna pracy napisana jest bardzo fachowo. Nie mam uwag do tej części rozprawy. Uważam, że pracę czyta się dobrze. Jest napisana „dobrym językiem”. Jednakże, pisząc doktorat autor nie ustrzegł się błędów językowych, które zwykle nie wymieniam w swoich recenzjach. W tym przypadku wymieniam jednak dwie takie usterki:

- 1) Trochę losowo użyte są nazwy tego samego defektu – raz defekt jest opisany jako luka rtęciowa (w moim odczuciu prawidłowa nazwa), ale w innych miejscach jako „wakansa rtęciowa” co jest wyrażeniem żargonowym, choć powszechnie stosowanym.
- 2) Rozbawił mnie błąd w nazwisku w referencji 46. Akurat nazwisko Piotrowski powinno być dobrze znane osobom pracującym w tematyce detektorów podczerwieni. Sorry za ten żartobliwy komentarz.

Czytając doktorat można łatwo zorientować się które części pracy były dokładnie weryfikowane/poprawiane (w szczególności rozdziały trzeci i czwarty). Najwięcej usterek językowych znalazłem w rozdziale pierwszym, który (pomijając te usterki) jest napisany z bardzo dużą znajomością tematyki badań przez doktoranta. **Na podstawie tego rozdziału mogę jednoznacznie potwierdzić, że doktorant posiada dużą wiedzę w tematyce prowadzonych prac w ramach doktoratu.**

Samą konstrukcję pracy oceniam jako prawidłową.

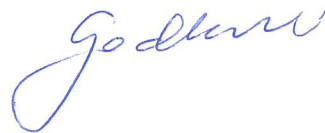
Podsumowanie

Podsumowując, uważam że uzyskane w rozprawie wyniki są **bardzo wartościowe. Doktorat wnosi znaczący wkład w uprawianą dziedzinę badań.** Po optymalizacji procesu wygrzewania zaobserwowano obniżenie „domieszkowania resztkowego” oraz wzrost ruchliwości nośników. W konsekwencji wytworzone testowe detektory charakteryzowały się znacząco lepszymi parametrami (wykrywalność promieniowania!) w porównaniu do produkowanych obecnie detektorów na długość fali 2 - 3,5 μm . Cel doktoratu został osiągnięty. **Stwierdzam więc, że praca doktorska mgr. inż. Jana Sobieskiego spełnia wszystkie wymagania formalne stawiane pracom doktorskim w odpowiednich ustawach i rozporządzeniach (art. 187 ustawy z dnia 20.07.2018 Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2023.742 z dnia 20.04.2023). Wnioskuje dopuszczenie doktoranta do dalszych etapów postępowania.**

Wniosek o wyróżnienie

W moim odczuciu praca doktorska ma duże znaczenie praktyczne. Wykonana w ramach doktoratu testowa seria detektorów na podczerwień ma znacząco lepsze parametry

(wykrywalność promieniowania podczerwonego) od obecnie produkowanych detektorów. **Ten wynik wskazuje na możliwość natychmiastowego wykorzystania wyników doktoratu przy produkcji diod na podczerwień! Jest to znaczący sukces pracy doktorskiej. Na tej podstawie wnioskuję o wyróżnienie tej rozprawy doktorskiej.**

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Godlewski', is positioned in the upper right area of the page.

