

prof. dr hab. inż. Marian Nowak
Instytut Fizyki – Centrum Naukowo-Dydaktyczne
Politechnika Śląska
40-019 Katowice, ul Krasińskiego 8
e-mail: marian.nowak@polsl.pl
tel. kom.: 666357124

Katowice, 2019.04.19

**Kwestionariusz - RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
DLA RADY WYDZIAŁU ELEKTRONIKI I TECHNIK INFORMACYJNYCH
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ**

Tytuł rozprawy: **Projektowanie dwubarierowych detektorów podczerwieni
z heterostruktur półprzewodnikowych w oparciu o inżynierię
przerwy energetycznej**

Autor rozprawy: **mgr inż. Mariusz Suligowski**

1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy /teza rozprawy/ i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora?
Jaki charakter ma rozprawa?

Głównym celem rozprawy było zaprojektowanie dwubarierowych detektorów podczerwieni pracujących w temperaturach bliskich temperaturze pokojowej w zakresie widmowym 3 - 5,5 oraz 8 - 14 μm z uwzględnieniem odkształceń sieciowych, dyslokacji niedopasowania i pasm donorowych w heterostrukturach półprzewodnikowych.

Autor jasno sformułował tezy swojej rozprawy, które zawarł w następujących stwierdzeniach:

1. Istnieje możliwość wytworzenia detektorów dwubarierowych bez energetycznych offsetów w paśmie przewodnictwa i walencyjnym.
2. Projektowanie tych detektorów wymaga uwzględnienia odkształceń sieciowych, dyslokacji niedopasowania i występowania pasm donorowych w warstwach silnie domieszkowanych donorami.

Rozprawa ma charakter teoretyczny, przy czym głównym zadaniem jakie postawił sobie jej Autor było zaprojektowanie detektorów o wysokich parametrach technicznych z heterostruktur antymonku indowo-arsenowego i tellurku kadmowo-rtęciowego pracujących bez kriogenicznego chłodzenia.

2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł /w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle/ świadczący o dostatecznej wiedzy autora. Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?

Pisząc tę rozprawę Autor dogłębnie przeanalizował dostępną literaturę światową wykazując się głęboką wiedzą i znajomością skomplikowanych zagadnień z zakresu fizyki półprzewodników, numerycznego rozwiązywania nieliniowych równań różniczkowo-całkowych a także problemów technologicznych związanych z wytwarzaniem nowoczesnych detektorów promieniowania podczerwonego. Przedstawione w rozprawie rozeznanie literatury ma charakter wartościowej monografii z krytyczną analizą dostępnych informacji. Autor rozprawy w sposób jasny i przekonujący sformułował wnioski wynikające z przeglądu źródeł literaturowych.

3. Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Autor rozwiązał postawione sobie zagadnienia w oparciu o racjonalne założenia i wykorzystując właściwe metody. Należy przy tym zauważyć, to co podkreślił Autor rozprawy, iż skorzystał on w sposób twórczy z dorobku naukowego swojego promotora dr hab. inż. Krzysztofa Józwickowskiego, prof. WAT, oraz całego zespołu pracowników Zakładu Fizyki Ciała Stałego Instytutu Fizyki Technicznej WAT od lat zajmujących się projektowaniem i badaniem detektorów promieniowania podczerwonego.

4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Oryginalność rozprawy polega na rozszerzonej analizie numerycznej zjawisk fotoelektrycznych i fluktuacyjnych w heterostrukturach półprzewodnikowych.

Za samodzielny i oryginalny dorobek Autora rozprawy uważam m.in. opracowanie metody obliczania przestrzennego rozkładu pasm energetycznych heterostruktur, która uwzględnia wpływ naprężeń sieciowych i dyslokacji niedopasowania występujących w strukturach wielowarstwowych. Naprężenia sieciowe wywołują odkształcenia sieciowe, prowadzące do przesuwania krawędzi pasm energetycznych, co niezwykle utrudnia prawidłową ocenę ich rozkładu przestrzennego.

W ramach pracy rozwinięto i udoskonalono iteracyjną metodę numerycznego rozwiązywania nieliniowego równania Poissona zaproponowaną wcześniej przez A. Józwickowską. Problem ten jest istotny w przypadku heterostruktur, w których występują gwałtowne zmiany parametrów materiałowych. Równanie Poissona jest głównym narzędziem do obliczania przestrzennego rozkładu struktury pasmowej heterostruktur w celu oceny ich przydatności do konstrukcji detektorów podczerwieni.

Innym ważnym zagadnieniem, które Autor przeanalizował były możliwości powstawania pasma donorowego i jego wpływu na transport nośników w heterostrukturach. Istnienie takiego pasma domieszkowego w warunkach silnego domieszkowania wpływa zarówno na koncentrację nośników, jak i położenie quasipoziomów Fermiego. Faktu tego nie uwzględnia chociażby program Apsys praktycznie stosowany w projektowaniu urządzeń półprzewodnikowych.

Autor przeanalizował możliwości zastosowania heterostruktur z dwoma barierami energetycznymi otaczającymi obszar absorbera w celu dodatkowego zmniejszenia tzw. prądów ciemnych w fotodetektorach. Autor rozprawy przeanalizował pracę detektorów dla struktur z CdHgTe w warunkach polaryzacji, co prowadzi do zmniejszenia generacji termicznej Augera (zjawisko ekskluzji i ekstrakcji nośników mniejszościowych z obszaru absorbera przez wbudowane pole elektryczne). Fakt ten można wykorzystać do uniknięcia specjalnego chłodzenia detektorów. W swoich rozważaniach Autor uwzględnił jednak również to, iż wbudowane pole elektryczne przyczynia się do wzrostu szybkości procesów generacyjno-rekombinacyjnych poprzez centra SHR związane zarówno z defektami punktowymi, jak i dyslokacjami.

W przypadku struktur $A^{III}B^V$ Autor przeanalizował struktury pasmowe detektorów dwubarierowych w warunkach równowagi termicznej w celu zaprojektowania struktur z minimalnymi „offsetami” oraz z możliwie niską gęstością dyslokacji niedopasowania. Analiza taka powinna pozwolić optymalnie zaprojektować struktury detekcyjne w celu skonstruowania detektorów podczerwieni o wysokich parametrach technicznych.

Rozprawa rozwija aktualny stan wiedzy dostępny w literaturze światowej na temat dwubarierowych detektorów podczerwieni pracujących w temperaturach bliskich temperaturze pokojowej w zakresie widmowym 3 - 5,5 oraz 8 - 14 μm . Przykładem tego jest opublikowanie części wyników tejże rozprawy w liczących się czasopismach naukowych oraz w materiałach konferencyjnych:

1. Józwickowska, K. Józwickowski, M. Suligowski, P. Moszczyński, M. Nietopiel, “The method for calculation of carrier concentration in narrow-gap n-type doped $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ structures”, *Optical and Quantum Electronics* 49 (2017) 121(1-8).
2. Józwickowska, K. Józwickowski, J. Antoszewski, L. Faraone, M. Suligowski, “Mobility of Two-Electron Conduction in Narrow-Gap n-type $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ Structures”, *IEEE Transactions on Electron Devices* 65 (2018) 4995 - 5001.

3. Józwickowska, K. Józwickowski, R. Ciupa, M. Suligowski, "Estimation of influence of lattice strain, bending and doping on the width of energy gap in InAsSb heterostructures", Journal of Applied Physics, w druku.
4. Józwickowska, K. Józwickowski, M. Suligowski, P. Moszczyński, M. Nietopiel, „The method for calculation of carrier concentration in narrow-gap n-type doped $Cd_xHg_{1-x}Te$ structures”, 16th Intern. Conf. on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices, 547028m (2016) 61-62.
5. Józwickowska, M. Suligowski, K. Józwickowski, "Enhanced numerical design of two barrier infrared detectors with III-V compounds heterostructures ", 18th International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices, (2018)

Dotychczasowe prace Autora rozprawy miały charakter współautorski, co mim zdaniem jest podyktowane i uzasadnione skomplikowanym charakterem rozpatrywanych zagadnień z zakresu high-tech.

5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników /zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy/?

Autor recenzowanej rozprawy wykazał się umiejętnością poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników. Jego rozprawa jest stosunkowo zwięzła (jak na ilość omawianych zagadnień). Została ona zredagowana w sposób jasny i poprawny. Rozprawa liczy 132. strony (oraz spis treści i streszczenia w języku polskim i angielskim), 89 rysunków (w tym wiele wieloczęściowych), 1. tabelę oraz łącznie 113 odnośników literaturowych. Na całość rozprawy składa się sześć rozdziałów stanowiących logiczną całość. Po sformułowaniu celu i głównych tez pracy, we Wstępie (rozdział 1) został Autor krótko przedstawił istniejący stan wiedzy i techniki w zakresie barierowych detektorów promieniowania podczerwonego. Autor opisał również zastosowany przez siebie program komputerowy do numerycznego modelowania zjawisk transportu w heterostrukturach półprzewodnikowych. W drugim rozdziale zostały zaprezentowane literaturowe dane na temat zagadnień związanych ze strukturą energetyczną InAsSb oraz AlAsSb oraz jej opisem matematycznym. Rozdział trzeci został poświęcony numerycznemu rozwiązaniu równania Poissona w heterostrukturach w celu obliczenia przestrzennego rozkładu krawędzi pasm energetycznych. W rozdziale tym Autor zaprezentował własne wyniki.

W kolejnym, czwartym rozdziale został przedstawiony problem pasm domieszkowych w półprzewodnikach o wąskiej przerwie energetycznej na przykładzie struktur CdHgTe. Zaproponowano modele umożliwiające obliczenie koncentracji elektronów w tych pasmach

oraz ich ruchliwości. Autor przedstawił zgodność wyników swoich obliczeń z doświadczalnymi danymi literaturowymi.

W piątym rozdziale przedstawiono modelowanie numeryczne nierównowagowych długofalowych detektorów (LWIR HOT) oraz detektorów na średni zakres podczerwieni (MWIR) z HgCdTe. Autor pokazał m.in. rolę dodatkowych barier energetycznych na granicy absorbera w procesie zmniejszania szybkości generacji termicznej nośników ładunku elektrycznego.

Rozdział szósty został poświęcony heterostrukturom z InAsSb, przy czym szczegółowo omówiono w nim m.in. problem wpływu odkształceń sieciowych na struktury energetyczne oraz charakterystyki widmowe detekcyjności znormalizowanej detektorów promieniowania podczerwonego. Uzyskane wyniki obliczeń numerycznych porównano z danymi eksperymentalnymi dostępnymi w literaturze. Wskazano, że obserwowane w niektórych przypadkach zwiększenie granicy fotoczułości może być spowodowane oddziaływaniem dyslokacji niedopasowania z polem naprężeń pseudomorficznych heterostruktur.

Na końcu rozprawy znajduje się bardzo krótkie podsumowanie całości pracy.

6. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

Za stosunkowo słabą stroną rozprawy uważam to, iż wyniki wykonanych obliczeń nie zostały skonfrontowane z danymi doświadczalnymi uzyskanymi w adekwatnych eksperymentach, a jedynie zostały porównane z danymi literaturowymi. Jak Autor rozprawy zauważa: brak jest kompletnych danych, które umożliwiłyby jednoznaczne odniesienie pomiędzy przeprowadzonymi obliczeniami a stanem rzeczywistym. Zdaję sobie jednak sprawę, iż wykonanie odpowiednich prac technologicznych oraz prac badawczych znacznie wykraczałoby ponad zakres pojedynczej pracy doktorskiej.

Niestety zaprojektowane heterostruktury o „wysokich parametrach technicznych z heterostruktur antymonku indowo-arsenowego i tellurku kadmowo-rtęciowego pracujących bez kriogenicznego chłodzenia” (sformułowanie Autora rozprawy) nie zostały jeszcze wytworzone i nie są znane ich ewentualne parametry funkcjonalne. Pozytywna weryfikacja wyników wykonanych obliczeń byłaby ich prawdziwym ukoronowaniem.

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Wysoko oceniam przydatność recenzowanej rozprawy dla nauk technicznych, a w szczególności dla głębszego poznania i zrozumienia zjawisk występujących w

heterostrukturach półprzewodnikowych wykorzystywanych do detekcji promieniowania podczerwonego. Praca ma również duże znaczenie aplikacyjne wskazując nowe możliwości w konstruowaniu detektorów promieniowania podczerwonego.

Przeprowadzona rozszerzona analiza numeryczna zjawisk fotoelektrycznych i fluktuacyjnych w heterostrukturach pozwala na zaprojektowanie detektorów HOT o wysokiej znormalizowanej wykrywalności D^* . Zastosowanie dwóch barier na granicach absorbera poprawia parametry techniczne detektorów nierównowagowych LWIR. Zastosowanie tych barier wzmacnia efekt ekсклюzji nośników ładunku oraz przyczynia się do wzrostu wzmocnienia fotoelektrycznego.

8. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:

- a/ nie spełniająca wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy
- b/ wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania
- c/ spełniająca wymagania
- d/ spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem
- e/ wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie.

Reasumując, zaliczam recenzowaną rozprawę jako wybitnie dobrą, zasługującą na wyróżnienie.

