

**RADA NAUKOWA DYSCYPLINY
AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA I ELEKTROTECHNIKA POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ**

zaprasza na

PUBLICZNĄ OBRONĘ ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
mgr. inż. Mariusza Suligowskiego

która odbędzie się w dniu **6 grudnia 2021** roku o godzinie **10:00** w trybie hybrydowym *

Temat rozprawy doktorskiej:

*„Projektowanie dwubarierowych detektorów podczerwieni z heterostruktur **półprzewodnikowych** w oparciu o inżynierię przerwy energetycznej”*

Promotor: prof. dr hab. inż. Krzysztof Józwickowski - Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie

Recenzenci: prof. dr hab. inż. Marian Nowak - Politechnika Śląska

prof. dr hab. inż. Włodzimierz Nakwaski - Politechnika Łódzka

* Zdalny udział w Obronie będzie możliwy poprzez platformę MS Teams. Osoby zainteresowane zdalnym uczestnictwem w obronie proszone są o zgłoszenie chęci uczestnictwa w formie elektronicznej na adres sekretarza komisji: dr inż. Andrzej Mazurak, email : andrzej.mazurak@pw.edu.pl w dniu 03.12.2021 do godz. 23:59

Z rozprawą doktorską i recenzjami można zapoznać się w Czytelni Biblioteki Głównej Politechniki Warszawskiej, Warszawa, Plac Politechniki 1.

Streszczenie rozprawy doktorskiej i recenzje są zamieszczone na stronie internetowej: <https://bip.pw.edu.pl/Postepowania-w-sprawie-nadania-stopnia-naukowego/Doktoraty/Wszczete-do-30-kwietnia-2019-r/Dyscyplina-automatyka-elektronika-i-elektrotechnika-dziedzina-nauk-inzynierjno-technicznych/mgr-inz.-Mariusz-Suligowski>.

Przewodniczący Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej

Prof. dr hab. inż. Tomasz Starecki

Streszczenie

Głównym celem rozprawy jest komputerowe projektowanie detektorów dwubarierowych z heterostruktur półprzewodnikowych, a w szczególności detektorów pracujących w temperaturach bliskich pokojowej w zakresie widmowym $3 - 5,5$ i $8 - 14$ μm . Detektory te powinny charakteryzować się wysokimi parametrami technicznymi oraz brakiem offsetów w paśmie przewodnictwa i walencyjnym.

Rozprawa składa się z sześciu zasadniczych punktów. Punkt pierwszy stanowi wstęp, w którym opisano działanie detektorów barierowych i ich właściwości, które zwiększają parametry tych detektorów podczerwieni. W punkcie tym omówiono również program komputerowy wykorzystywany w rozprawie do projektowania detektorów barierowych. W punkcie drugim krótko przedstawiono strukturę pasmową związków InAsSb i AlAsSb. Punkt trzeci opisuje iteracyjną metodę rozwiązywania równania Poissona w heterostrukturach z wykorzystaniem nowych schematów iteracyjnych, gwarantujących stabilność i zbieżność rozwiązań niezależnie od stopnia skomplikowania konstrukcji przyrządów półprzewodnikowych. Przedstawiono tam opracowane schematy iteracyjne oraz wyniki obliczeń dla heterostruktur HgCdTe z kontaktami metalowymi i warstwą pasyującą z ZnS. W punkcie czwartym rozprawy analizowano pasma donorowe w strukturach HgCdTe. Zaproponowano proste modele umożliwiające obliczenie koncentracji elektronów w tych pasmach oraz ich ruchliwości. Rezultaty obliczeń zostały zweryfikowane eksperymentalnie. Punkt piąty zawiera wyniki obliczeń parametrów dwubarierowych detektorów z HgCdTe pracujących w zakresie widmowym $3 - 5,5$ μm i $8 - 14$ μm . W punkcie tym przedstawiono udział różnych mechanizmów generacyjno – rekombinacyjnych w procesie generacji i rekombinacji termicznej. Punkt ten analizuje również zjawisko reabsorpcji fotonów zmniejszających procesy międzypasmowej rekombinacji promienistej. Punkt ten pokazuje również rolę dodatkowych barier energetycznych na granicy absorbera w procesie zmniejszania szybkości generacji termicznej nośników. Punkt szósty (najbardziej rozbudowany) dotyczy heterostruktur z InAsSb. W ramach tego punktu przeprowadzono analizę wpływu niedopasowania sieciowego poszczególnych warstw heterostruktury na przesunięcie krawędzi pasm energetycznych. Punkt ten analizuje również wpływ odkształceń sieciowych wywołanych zginaniem struktur oraz generacją dyslokacji niedopasowania. Ważnym osiągnięciem jest tu opracowanie sposobu liczenia gęstości dyslokacji w poszczególnych interfejsach korzystając z warunku minimum energii sprężystej heterostruktury. Wyniki obliczeń struktury pasmowej zweryfikowano z danymi eksperymentalnymi dostępnymi w literaturze. Wykazano również, że obserwowane w niektórych przypadkach zwiększenie granicy fotoczułości może być spowodowane oddziaływaniem dyslokacji niedopasowania z polem naprężeń pseudomorficznych heterostruktur. W punkcie tym zaprojektowano również detektory pracujące w temperaturze 200 K w zakresie $3 - 5,5$ i $8 - 14$ μm .

Abstract

My dissertation concerns computer design of dual-barrier detectors from semiconductor heterostructures. Its aim is to design the detectors that will operate near room temperatures in the spectral range of 3 - 5.5 and 8 - 14 μm . These detector should be characterized by high technical parameters and lack of offsets in the conduction and valence band.

The dissertation consists of six main points. The first point is the introduction, which describes the operation of barrier detectors and their properties that increase the technical parameters of these infrared detectors. This point also discusses the computer program used in the design of barrier detectors. The second section briefly presents the band structure of InAsSb and AlAsSb compounds. The third point describes the iterative method of solving the Poisson equation in heterostructures with the use of new iterative schemes, guaranteeing stability and convergence of solutions regardless of the complexity of semiconductor devices construction. There are presented iterative schemes and calculation results for HgCdTe heterostructures with metal contacts and the ZnS passivation layer. At the fourth point of the dissertation, donor bands in HgCdTe structures were analyzed. Simple models were proposed to calculate electron concentration in these bands and their mobility. The results of the calculations were verified experimentally. The fifth point contains the results of calculating the parameters of two-barrier HgCdTe detectors operating in the spectral range of 3 - 5.5 μm and 8 - 14 μm . This section presents the contribution of various generation-recombination mechanisms in the process of thermal generation and recombination. This point also analyzes the phenomenon of reabsorption of photons that reduce the processes of interband radiative recombination. This point also shows the role of additional energy barriers at the absorber boundary in the process of decreasing the thermal generation rate of carriers. The sixth point (the most extensive) concerns heterostructures with InAsSb. In this point, the analysis of the impact of lattice mismatches of individual layers of heterostructures on the shift of the edges of energy bands was carried out. This point also analyzes the impact of the lattice strain caused by the bending of structures and the generation of misfit dislocations. An important achievement here is the development of a method of counting the density of dislocations in individual interfaces using the condition of minimum elastic energy of the heterostructure. The results of the band structure calculations were verified with experimental data available in the literature. It was also shown that the increase in wavelength photosensitivity limit observed in some cases may be caused by the misfit dislocations which interact with the field of pseudomorphic stresses of heterostructures. At this point, detectors working at 200 K in the range of 3 - 5.5 and 8 - 14 μm have also been designed.

Profesor dr hab. inż. Włodzimierz Nakwaski

20 marca 2019 r.

(powtórnie wysłana 18 czerwca 2019 r.)

(po raz trzeci wysłana 18 października 2019 r.)

Instytut Fizyki, Politechnika Łódzka, ul. Wólczańska 219, 90-924 Łódź

e-mail: wlodzimierz.nakwaski@p.lodz.pl

**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 (teoretyczny, doświadczalny, inny)?**

Podstawowym deklarowanym celem recenzowanej rozprawy jest teoretyczna analiza możliwości zaprojektowania dwubarierowych detektorów podczerwieni działających w temperaturach bliskich temperaturze pokojowej, a pracujących w zakresach widmowych od 3 μm do 5.5 μm lub od 8 μm do 14 μm przy uwzględnieniu wpływu odkształceń sieciowych, dyslokacji niedopasowania i pasm donorowych. Zgodnie z autorem rozprawy z powyższego wynikają następujące dwie tezy:

pierwsza - o możliwości znalezienia takiej struktury dwubarierowych detektorów promieniowania (będzie o niej jeszcze mowa w dalszej treści recenzji), która nie zawierałaby dodatkowych barier w obu pasmach dozwolonych ograniczających ucieczkę elektronów i dziur z obszaru absorbera do odpowiednich warstw kontaktowych oraz

druga – o konieczności uwzględnienia odkształceń sieciowych, dyslokacji niedopasowania i pasm donorowych w warstwach detektora silnie domieszkowanych donorami podczas projektowania powyższych detektorów.

Z powyższego wynika, że deklarowanym końcowym celem recenzowanej rozprawy jest zaprojektowanie dla powyższych zakresów widmowych odpowiednich detektorów promieniowania pracujących w temperaturach bliskich pokojowej bez kriogenicznego chłodzenia przy wykorzystaniu dostępnych obecnie heterostruktur z antymonku indow-arsenkowego bądź tellurku kadmowo-rtęciowego.

- 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?**

Przeprowadzona przez doktoranta analiza krajowych i zagranicznych źródeł literaturowych została dokonana prawidłowo i wyczerpująco. Również możliwości praktycznego zastosowania rozwiązań analizowanych w rozprawie zagadnień naukowych zostały przedstawione w sposób właściwy i ze znajomością rzeczy. Powyższe dowodzi odpowiedniej i wyczerpującej wiedzy doktoranta dotyczącej analizowanych w rozprawie zagadnień naukowych.

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

Dokładne modelowanie przyrządu półprzewodnikowego wymaga rozwiązania w jego obszarze powiązanych ze sobą czterech równań różniczkowych: równania Poissona, dwóch równań ciągłości dla elektronów i dziur oraz równania bilansu energetycznego. Otrzymany z tych równań rozkład potencjału elektrycznego umożliwia dla danej struktury przyrządu półprzewodnikowego wyznaczenie jego modelu pasmowego. Znanych jest sporo numerycznych metod rozwiązywania powyższego układu równań. Sporo też jest oferowanych programów komercyjnych do tego celu. Nie są one jednak dostatecznie uniwersalne i często w konkretnym przypadku ich użyteczność okazuje się wątpliwa. Tak właśnie jest w przypadku analizowanym w niniejszej rozprawie.

Kluczowe dla powyższego modelowania jest rozwiązanie równania Poissona dla struktury przyrządu z odpowiednimi warunkami brzegowymi. Doktorant, jak stwierdził w treści Swojej rozprawy doktorskiej, pracował nad tym zagadnieniem razem z dr Aliną Józwicką, więc otrzymane wyniki należy traktować jako ich wspólne osiągnięcie. Zastosowana przez nich numeryczna metoda obliczeń została w rozprawie doktoranta dokładnie opisana. Jej zbieżność i dokładność zależy w dużej mierze od właściwego dla danej struktury doboru zarówno metody obliczeń rachunkowych, jak i zastosowania odpowiedniego kroku pseudo-czasowego. Numeryczne wyniki wymagają zwykle długotrwałych obliczeń o często wątpliwej zbieżności i dokładności. Stąd więc znalezienie dla rozsądnego czasu obliczeń dokładniejszego iteracyjnego rozwiązania równania Poissona w analizowanej strukturze półprzewodnikowej jest niewątpliwym znaczącym wspólnym praktycznym osiągnięciem obojga współautorów.

Powyższa metoda obliczeń została zastosowana przez doktoranta i zaprezentowana w treści rozprawy do projektowania niejednorodnych struktur fotodetektorów promieniowania podczerwonego wykonanych z heterostruktur HgCdTe i InAsSb, a więc materiałów półprzewodnikowych o wąskiej przerwie energetycznej, o których to heterostrukturach będzie jeszcze mowa w dalszej treści niniejszej recenzji.

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.

Najbardziej znaczącym wynikiem przedstawionym przez doktoranta w Jego rozprawie jest numeryczna analiza pracy analizowanych heterostrukturnych fotodetektorów podczerwieni przy uwzględnieniu silnego domieszkowania użytych materiałów półprzewodnikowych i przyjęciu ich dwuelektronowego przewodnictwa związanego z istnieniem pasm domieszkowych. Ponadto doktorant w Swym modelu uwzględnił istotne odkształcenia sieciowe, będące głównie konsekwencją naprężeń mechanicznych między

warstwami przyrządu o różnych stałych sieci. W tym kontekście niezwykle istotnym stało się wyznaczenie przez Doktoranta dyslokacji niedopasowania na granicach poszczególnych warstw heterostruktury przyrządu, które, jak wiadomo, częściowo redukują powyższe naprężenia mechaniczne. Otrzymane przez Niego teoretyczne wyniki zostały, również przez Niego, potwierdzone eksperymentalnie poprzez badanie widm fotoluminescencyjnych użytych materiałów.

Jako optymalne konstrukcje rozpatrywanych fotodetektorów Doktorant zaproponował zastosowanie struktury dwubarierowej, tj. dodanie po obu stronach warstwy absorbera silnie domieszkowanych cienkich barier energetycznych o szerszej przerwie energetycznej, blokujących ucieczkę generowanych nośników z tego obszaru. Ponadto Doktorant dowiódł możliwości uzyskania takich struktur fotodetektorów dwubarierowych, które nie wykazywałyby niekorzystnego istnienia „offsetu”, jak nazwał niekorzystne pojawianie się dodatkowej bariery potencjału w przeciwnym pasmie dozwolonym, tj. w pasmie przewodnictwa w przypadku ograniczania ucieczki dziur oraz w pasmie walencyjnym w przypadku ograniczania ucieczki elektronów.

Końcowym rezultatem powyższej analizy jest zaprojektowanie przez Doktoranta dwubarierowych struktur fotodetektorów wykonanych zarówno z heterostruktur HgCdTe, jak i z heterostruktur InAsSb, dla obu (średniofalowego i długofalowego) zakresów podczerwieni.

Powyższa teoretyczna analiza działania heterostrukturnych przyrządów półprzewodnikowych została użyta do zaprojektowania optymalnych struktur dla obu rozpatrywanych fotodetektorów. Optymalnych, to znaczy takich, które umożliwiają ich poprawną pracę w temperaturze pokojowej (lub w jej pobliżu) bez konieczności kriogenicznego chłodzenia, co radykalnie poprawia własności użytkowe badanych fotodetektorów. Otrzymane wyniki zostały zaprezentowane podczas zeszłorocznej konferencji naukowej NUSOD 2018 oraz tegorocznej konferencji NUSOD 2019, a ich dokładniejszy opis jest treścią artykułu wysłanego do Infrared Physics and Technology. Współautorem obu powyższych prac jest autor recenzowanej rozprawy.

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

Redakcyjna poprawność prezentacji wyników otrzymanych przez Doktoranta w recenzowanej rozprawie jest bez zarzutu. Rozprawa jest napisana poprawnym językiem, czyta się ją z przyjemnością. Rysunki są czytelne i dobrze opisane.

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

Otrzymane przeze mnie materiały, które miały mi umożliwić przygotowanie recenzji, nie zawierały zyciorysu naukowego doktoranta, a przede wszystkim listy Jego dotychczasowych publikacji i wystąpień konferencyjnych. Być może takie są obecnie zasady. Jednakże, nawet jeśli tak jest, zasady te są co najmniej niepoprawne i utrudniają właściwą ocenę dotychczasowego dorobku doktoranta i Jego rozprawy.

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

prof. dr hab. inż. Marian Nowak
Instytut Fizyki – Centrum Naukowo-Dydaktyczne
Politechnika Śląska
40-019 Katowice, ul Krasieńskiego 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.

prof. dr hab. inż. Marian Nowak
Instytut Fizyki – Centrum Naukowo-Dydaktyczne
Politechnika Śląska
40-019 Katowice, ul Krasieńskiego 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 sformulowano 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 Jóźwikowskiego, 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. Jóźwikowską. 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. Jóźwikowska, K. Jóźwikowski, 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. Jóźwikowska, K. Jóźwikowski, 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. Jóźwikowska, K. Jóźwikowski, 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. Jóźwikowska, K. Jóźwikowski, M. Suligowski, P. Moszczyński, M. Nietopiel, "The method for calculation of carrier concentration in narrow-gap n-type doped $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ structures", 16th Intern. Conf. on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices, 547028m (2016) 61-62.
5. Jóźwikowska, M. Suligowski, K. Jóźwikowski, "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 ekskluzji 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.

