

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  $\mu\text{m}$  do 5.5  $\mu\text{m}$  lub od 8  $\mu\text{m}$  do 14  $\mu\text{m}$  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 indowarsenkowego bądź tellurku kadmowo-rtęciowego.

- 2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł / w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle / świadcząco 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 Józwickowską, 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 życiorysu 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?**

Struktury nowych półprzewodnikowych przyrządów elektronicznych stają się coraz bardziej skomplikowane i są często wykonane z nowych i coraz bardziej skomplikowanych trój- a nawet czteroskładnikowych materiałów. Analiza działania tych przyrządów jest więc coraz bardziej złożona i zależna od jego szczególnej struktury pasmowej. Dostępne programy komercyjne nie są najczęściej w stanie właściwie opisać działania takich nowych przyrządów, analizują ich działanie w sposób standardowy, zwykle jednakowy dla różnych ich struktur. Dlatego w przypadku projektowania zupełnie nowych przyrządów elektronicznych są te programy często mało przydatne i należy najczęściej opracować dla nich własne programy numeryczne dostosowane do specyfiki tych przyrządów. I takiemu właśnie zagadnieniu jest poświęcona recenzowana rozprawa doktorska.

Zastosowana w rozprawie teoretyczna metodyka analizy działania nowych przyrządów półprzewodnikowych jest godna powszechnego zastosowania. Jednakże należy podkreślić fakt, że zaproponowane w niniejszej rozprawie struktury nowych przyrządów nie są uniwersalne. Optymalne konstrukcje innych przyrządów, o innej strukturze i/lub wykonanych z innych materiałów, będą prawdopodobnie zupełnie inne. Tak więc proponowane w rozprawie struktury powinny być stosowane jedynie dla przyrządów dostatecznie podobnych do tych, które były przedmiotem przedstawionej w niej analizy. Natomiast godna uwagi i powszechnego upowszechnienia jest przedstawiona w rozprawie sama metodyka działań prowadzących do optymalnych struktur nowoprojektowanych przyrządów elektronicznych.

#### **8. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:**

Recenzowana rozprawa dowodzi zasadniczo głównie umiejętności teoretycznych Doktoranta, choć zawiera również wyniki Jego pewnych osiągnięć eksperymentalnych. Jest ona przygotowana na temat niewątpliwie istotny z punktu widzenia rozwoju nauk technicznych, szczególnie elektroniki półprzewodnikowej, a napisana jest bardzo poprawnym językiem, tworząc logicznie zebraną całość. Jej treść dowodzi odpowiedniej wiedzy jej autora dotyczącej fizycznych podstaw działania analizowanych przyrządów półprzewodnikowych, a prezentowane w rozprawie główne osiągnięcie naukowe, tj. opracowanie przy użyciu nowych materiałów półprzewodnikowych konstrukcji dwóch nowych fotodetektorów dla promieniowania podczerwonego, jest według mnie wystarczające dla postulowanego awansu naukowego Doktoranta. Więc, mimo pewnych zastrzeżeń dotyczących dotychczasowego ubożego dorobku publikacyjnego jej Autora, uważam, że w pełni dowiódł On Swoich umiejętności uprawniających do uzyskania stopnia naukowego doktora nauk technicznych. Decyduję się więc zaliczyć tę rozprawę jako:

**d/ spełniająca wymagania z wyraźnym naddatkiem.**

Łódź, 3 listopada 2021.

podpis  
