

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, 2021.08.21

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Olgi Markowskiej

p.t. „Mechanizmy generacyjno-rekombinacyjne generowanych optycznie nadmiarowych nośników w heterostrukturach z tellurku kadmowo-rtęciowego

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 przeanalizowanie różnych mechanizmów generacyjno-rekombinacyjnych (G-R) oraz teoretyczne wyznaczenie czasów życia nośników generowanych optycznie w nierównowagowych warunkach pracy detektorów z HgCdTe optymalizowanych na zakresy średniej (MWIR) oraz długofalowej (LWIR) podczerwieni. W szczególności uwzględniono wpływ płytkich stanów domieszkowych, luk rtęci oraz dyslokacji. Głównymi, jasno sformułowanymi tezami rozprawy były następujące stwierdzenia:

1. Rekombinacja z udziałem płytkich stanów domieszkowych ma znaczący wpływ na czas życia nośników mniejszościowych i determinuje czas życia nośników większościowych.
2. Obliczanie czasu życia elektronów i dziur musi uwzględniać wzajemną korelację między koncentracjami nośników ładunku wynikającą z warunku neutralności elektrycznej.
3. Oddziaływanie elektryczne nośników występujących w dyslokacjach niedopasowania wpływa na funkcje rozkładu zgromadzonych tam nośników, ale ma bardzo niewielki wpływ na ilość wygenerowanych dyslokacji w obszarach zmiany składu molowego heterostruktur.

Istotnym zadaniem doktorantki było wykorzystanie opracowanych przez siebie modeli matematycznych w programie komputerowym opracowanym przez promotora prof. dr hab. inż. Krzysztofa Józwickowskiego i stosowanym do modelowania zjawisk fotoelektrycznych w strukturach półprzewodnikowych.

Rozprawa ma charakter teoretyczny, przy czym Autorka porównała wyznaczone przez siebie charakterystyki z dostępnymi w literaturze danymi eksperymentalnymi. W wyniku tego Autorka określiła i przedyskutowała wartości parametrów analizowanych materiałów.

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

Pisząc tę rozprawę Autorka dogłębnie przeanalizowała 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. Autorka rozprawy w sposób jasny i przekonujący sformułowala wnioski wynikające z przeglądu źródeł literaturowych.

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

Autorka rozwiązała postawione sobie zagadnienia w oparciu o racjonalne założenia i wykorzystując właściwe metody. Należy przy tym zauważyć, to co podkreśliła Autorka rozprawy, iż skorzystała ona w sposób twórczy z dorobku naukowego swojego promotora prof. dr hab. inż. Krzysztofa Jóźwikowskiego, oraz zespołu pracowników Wojskowej Akademii Technicznej i Vigo System S.A. 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 krytycznej analizie teoretycznej i numerycznej zjawisk generacyjno-rekombinacyjnych w tellurku kadmowo-rtęciowym (HgCdTe) wykorzystywanym do konstrukcji detektorów promieniowania podczerwonego.

Autorka rozprawy wykazała, iż uzyskanie dobrego dopasowania do wyników eksperymentalnych wymaga uwzględnienia procesów rekombinacji związanych z domieszkami. Obliczając czas życia nośników ładunku pokazała udział poszczególnych mechanizmów rekombinacji w funkcji koncentracji domieszek oraz temperatury. Zaproponowała metodę obliczania czasów życia namiarowych elektronów i dziur w warunkach nierównowagowych z uwzględnieniem wzajemnej korelacji pomiędzy koncentracjami elektronów, dziur, zjonizowanych domieszek i stanów pułapkowych.

Autorka dokonała modyfikacji stosowanych dotychczas modeli dyslokacji niedopasowania jako dodatkowego kanału rekombinacji. Opracowała model dyslokacji umożliwiający określenie szybkości rekombinacji i generacji termicznej nośników poprzez mechanizm Schockleya-Reada-Halla (SRH) z udziałem pasma dyslokacyjnego.

Zaproponowała numeryczną metodę obliczania prądów upływności powierzchniowej. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów charakterystyk prądowo-napięciowych $I(V)$ dla cylindrycznych fotodiod typu „mesa” o różnych średnicach, wskazała, że po procesie pasywacji mogą tworzyć się dyslokacje niedopasowania na powierzchni struktury, w wyniku czego parametry elektryczne detektorów ulegają pogorszeniu.

Rozprawa rozwija aktualny stan wiedzy dostępny w literaturze światowej na temat mechanizmów generacyjno-rekombinacyjnych w dwubarierowych detektorach 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. O. Markowska, M. Kopytko, J. Rutkowski, A. Kowalewski, i P. Martyniuk, „Experimental determination of leakage current occurring in HgCdTe infrared detectors operating in the mid-infrared”, w 12th Conference on Integrated Optics: Sensors, Sensing Structures, and Methods, wrz. 2017, t. 10455, s. 104550V. doi: 10.1117/12.2282883.
2. A. Jóźwikowska, R. Ciupa, O. Markowska, i K. Jóźwikowski, „Enhanced numerical design of HgCdTe MWIR HOT P+vN+ photodiodes”, w 2019 International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices (NUSOD), lip. 2019, s. 85–86. doi: 10.1109/NUSOD.2019.8806961.
3. A. Jóźwikowska, O. Markowska, i K. Jóźwikowski, „Numerical estimation of lattice strain, bending and generation of misfit dislocations in CdHgTe heterostructures grown on GaAs substrate”, Opt. Quantum Electron., t. 52, nr 6, s. 294, maj 2020, doi: 10.1007/s11082-020-02391-9.

Dotychczasowe prace Autorki 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/?

Autorka recenzowanej rozprawy wykazała się umiejętnością poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników. Jej rozprawa jest stosunkowo zwięzła (jak na ilość omawianych zagadnień). Została ona zredagowana w sposób jasny i poprawny. Rozprawa liczy 167 stron. Zawiera spis treści, listę akronimów i symboli, streszczenia w języku polskim i angielskim, 74 rysunki (w tym wiele wieloczęściowych) oraz 84 odnośniki literaturowe. Na całość rozprawy składa się sześć rozdziałów, podsumowanie oraz dwa dodatki stanowiące logiczną całość.

We Wprowadzeniu (rozdział 1 liczący 5 stron) Autorka krótko przedstawił znaczenie tellurku kadmowo-rtęciowego (HgCdTe) dla konstrukcji detektorów promieniowania podczerwonego a także aktualne zagadnienia związane z technologią jego wytwarzania i zjawiskami wpływającymi na funkcjonalność gotowych detektorów. W tym rozdziale zostały sprecyzowane cele i tezy rozprawy. Celami były krytyczna analiza różnych mechanizmów generacyjno- rekombinacyjnych (G-R), oraz teoretyczne wyznaczenie czasów życia nośników generowanych optycznie w nierównowagowych warunkach pracy detektorów z HgCdTe ze szczególnym uwzględnieniem wpływu płytkich stanów domieszkowych, luk rtęci oraz dyslokacji. W tym rozdziale mgr inż. Olga Markowska przedstawiła główne tezy swojej rozprawy.

W drugim rozdziale (19 stron, 16 głównie wieloczęściowych rysunków z wyznaczonymi charakterystykami) Autorka zaprezentowała zastosowane przez siebie metody obliczeń oraz uzyskane rezultaty symulacji numerycznych dla nierównowagowych fotodiod z HgCdTe typu P^+vN^+ oraz w konstrukcji z komplementarnymi barierami P^+BvBN , pracujących w zakresach MWIR oraz LWIR.

W kolejnym, trzecim rozdziale (34 strony, 6 rysunków) zostały przedstawiony mechanizmy G-R w HgCdTe. W szczególności Autorka omówiła kinetykę procesów generacyjno-rekombinacyjnych związanych z lukami rtęci w HgCdTe, procesy związane z G-R elektronów z udziałem atomów donorowych a także akceptorowych, rekombinację promienistą i fononową, rekombinację Augera i procesy międzypasmowe. Wyprowadzone w tym rozdziale wzory mają istotne znaczenie dla wykonania symulacji różnych procesów G-R w HgCdTe.

Czwarty rozdział (15 stron, 16 wieloczęściowych rysunków z wyznaczonymi charakterystykami) Autorka poświęciła wyznaczeniu wypadkowych czasów życia elektronów i dziur w HgCdTe typu p oraz typu n. Na podkreślenie zasługuje fakt, iż mgr inż. Olga Markowska porównała wyznaczone przez siebie charakterystyki z dostępnymi w literaturze danymi eksperymentalnymi. W wyniku tego Autorka określiła i przedyskutowała wartości parametrów analizowanych materiałów.

W piątym rozdziale (42 strony, 21 rysunków) problem dyslokacji niedopasowania w heterostrukturach HgCdTe oraz metody obliczania ich gęstości. W szczególności Autorka przedstawiła swój model dyslokacji jako obszarów o zwiększonej rekombinacji powierzchniowej. W swoim modelu uwzględniła wpływ pola elektrycznego na kinetykę procesów SRH związanych z dyslokacjami. Na wykresach przedstawiła wyznaczone równowagowe funkcje rozkładu określające prawdopodobieństwo obsadzenia stanu w

paśmie dyslokacyjnym przez elektron, w warunkach równowagi termicznej w funkcji składu molowego, w silnie domieszkowanych materiałach typu n oraz typu p.

Szósty rozdział (14 stron, 11 rysunków) Autorka poświęciła procesom rekombinacji powierzchniowej i jej wpływowi na funkcjonowanie detektorów promieniowania podczerwonego w różnych temperaturach. Przeanalizowała wyniki eksperymentalne uzyskane w badaniach gęstość prądu w funkcji napięcia, dla detektorów HgCdTe typu „mesa” o różnych średnicach (od 100 do 500 μm) i funkcjonujących różnych temperaturach (od 90 do 200 K). Przy tym przedstawiono wyniki badań zarówno niepasywowanych jak i pasywowanych poprzez anodyzowanie lub jonowo za pomocą techniki sputteringu.

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 Autorka 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.

Przykrym obowiązkiem recenzenta jest wytknięcie ewentualnych uchybień w recenzowanej pracy. Moje zastrzeżenia dotyczą pewnych niedociągnięć edycyjnych (podaję w oryginalnej pisowni):

- str. 68: Wyrażenie (93) będzie przez jeszcze użyte w dalszej części rozprawy przy definicji wypadkowego czasu życia elektronów i dziur;
- str. 76: Czasy życia elektronów i dziur ograniczony rekombinacją A1 i A7, przy zastosowaniu zależności (118) i (93) wyrażają się następująco;
- str. 77: W poniższym podrozdziale 4.1 oraz 4.1 zostały przedstawione obliczenia wykonane;
- str. 94: Zginanie warstw, powoduje dodatkowe zmiany stałej sieci, ale jednocześnie nico zmniejsza stan naprężeń sieciowych w strukturze.
- str. 129: . Rys. 58 i Rys. 59 przedstawiają zależności funkcji f_{DIS}^0 od składu molowego w silnie domieszkowanych materiałach typu p i n.
- str. 152: policzono, jako uśrednioną drugą pochodną krawędzi pasma
- str. 154: Pierwsze dwa składowe w równaniu

Podpisy osi rys. 34, 35b, 36b powinny dotyczyć elektronów zamiast dziur.

Niejasne jest stwierdzenie jednostek gęstość ładunku elektrycznego:

- str. 97: Obliczony rozkład ładunku elektrycznego rdzeni dyslokacji pozwala oszacować gęstość ładunku elektrycznego rzędu $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ w interfejsie GaAs-CdTe.

W ostatnich dwóch liniijkach na stronie 113 zamiast tekstu należało zapisać równanie opatrzone odpowiednim numerem.

Wymienione usterki i uchybienia nie mają w moim przekonaniu istotnego znaczenia dla całości pracy.

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 generacyjno-rekombinacyjnych oraz teoretyczne wyznaczenie czasów życia nośników generowanych optycznie w nierównowagowych warunkach pracy pozwala na optymalizowanie detektorów z HgCdTe na zakresy średniej (MWIR) oraz długofalowej (LWIR) podczerwieni.

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 stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Olgi Markowskiej spełnia wymogi stawiane przez odpowiednią ustawę o stopniach naukowych oraz tytule naukowym i stawiam wniosek o dopuszczenie Autorki do kolejnych etapów przewodu doktorskiego.

Zaliczam recenzowaną rozprawę jako wybitnie dobrą, zasługującą na wyróżnienie.

