



**Wojskowa
Akademia
Techniczna**
im. Jarosława Dąbrowskiego

**Instytut
Optoelektroniki** 

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Bielecki

Warszawa, 08.08.2022r.

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
DLA RADY DYSCYPLINY NAUKOWEJ
AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA I ELEKTROTECHNIKA
POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ**

Tytuł rozprawy: Opracowanie technologii związków półprzewodnikowych na bazie InP do konstrukcji kwantowego lasera kaskadowego

Autor rozprawy: mgr inż. Mikołaj Badura

- 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)?**

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Mikołaja Badury, dotyczy opracowania technologii epitaksjalnego wzrostu elementów składowych struktury kwantowego lasera kaskadowego techniką LP-MOVPE, które zostały wykonane w Katedrze Mikroelektroniki i Nanotechnologii, Wydziału Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki Politechniki Wrocławskiej. Przeprowadzone badania były możliwe dzięki wsparciu aż dziewięciu projektów badawczych finansowanych przez Narodowe Centrum Nauki, Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego, Narodowej Agencji Wymiany Akademickiej oraz współpracy w ramach sieci technologicznej pomiędzy Katedrą Mikroelektroniki i Nanotechnologii, Wydziału Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki Politechniki Wrocławskiej i Zakładem Nanotechnologii Uniwersytetu w Maladze.

Autor sformułował następującą tezę pracy:

Możliwe jest zastosowanie opracowanej technologii LP-MOVPE elementów składowych struktury epitaksjalnej kwantowego lasera kaskadowego w konstrukcjach przyrządowych.

Praca doktorska mgr. inż. Mikołaja Badury ma charakter doświadczałny. Składa się ona z 11. rozdziałów oraz wykazu literatury.

W rozdziale pierwszym, będącym wstępem do niniejszej pracy, podano informacje dotyczące zakresu przeprowadzonych badań.

W rozdziale drugim Doktorant przedstawił historię rozwoju nauki, która doprowadziła do opracowania kwantowego lasera kaskadowego.

W rozdziale trzecim przedstawiono budowę i podstawy zasady działania lasera QCL.

W rozdziale czwartym Autor przedstawił cel badań, główne zadania badawcze oraz tezę pracy.

W rozdziale piątym zawarto opis podstawowych technik epitaksjalnych (MBE i MOVPE). Przedstawiono budowę stanowiska do epitaksji z fazy gazowej z użyciem związków metaloorganicznych - MOVPE.

W rozdziale szóstym omówiono zasadę działania głównych technik pomiarowych stosowanych w obszarze merytorycznym doktoratu. Omówiono stanowisko do pomiarów fotoluminescencji, układ pomiarowy dyfraktometru rentgenowskiego, komórkę stosowaną w pomiarach EC-V oraz mikroskop sił atomowych.

W rozdziale siódmym opisano proces technologii z których wykonane były poszczególne elementy lasera kaskadowego.

Rozdział ósmy zawiera opis zastosowania opracowanej technologii warstw grubych do wytworzenia struktur kwantowych. Omówiono narzędzia obliczeniowe pomocne przy analizie widm fotoluminescencyjnych otrzymanych struktur. Opisano możliwości zastosowania opracowanej technologii LP-MOVPE studni kwantowych InGaAs jako obszaru czynnego oraz supersieci InGaAs/AlInAs obszaru wstrzykiwania rdzenia QCL.

W rozdziale dziewiątym przedstawiono wyniki opracowanej technologii do wytworzenia rdzenia lasera QCL. Określono parametry otrzymanej struktury. Zawarto analizę wyników badań dotyczących wpływu temperatury wygrzewania rdzenia na jego parametry. Wykazano, że optymalizacja czasu wygrzewania podłoży umożliwiła wyeliminowanie defektów zaburzających wzrost struktur epitaksjalnych.

Rozdział dziesiąty zawiera opis wpływu zastosowania opracowanej technologii elementów lasera QCL na parametry użytkowe opracowanych struktur laserów.

W rozdziale ostatnim zawarto podsumowanie wyników pracy. Stwierdzono przydatność opracowanej technologii LP-MOVPE do konstrukcji elementów kwantowego lasera kaskadowego.

Rozprawa liczy 164 strony, w tym po 22 strony stanowi literatura i dodatek.

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

Załączony wykaz cytowanej literatury obejmuje 139 pozycji. Analiza źródeł, zarówno krajowych jak i międzynarodowych, została przeprowadzona z dużą starannością. Przedstawione źródła literaturowe są aktualne i ich lektura świadczy o dostatecznej wiedzy Autora z zakresu merytorycznego rozprawy. Wnioski z przeglądu źródeł literaturowych sformułowano właściwie.

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

Autor niniejszej rozprawy doktorskiej podjął się badań związanych z optymalizacją procesu LP-MOVPE, w celu otrzymania w pełni kontrolowanych i powtarzalnych właściwości elementów składowych struktury epitaksjalnej lasera QCL, dopasowanej sieciowo do podłoża InP. Zatem, głównym celem pracy było opracowanie technologii epitaksjalnego wzrostu elementów składowych struktury kwantowego lasera kaskadowego techniką LP-MOVPE.

Metodologia prowadzonych przez Autora prac badawczych zakładała: wytwarzanie, charakteryzację i optymalizację elementów składowych struktury epitaksjalnej lasera QCL oraz optymalizację poszczególnych procesów technologicznych, które stanowią w pełni kontrolowaną technologię wytwarzania struktury epitaksjalnej lasera QCL.

Dla zrealizowania założonego celu pracy i udowodnienia tez Doktorant przeanalizował szereg problemów badawczych dotyczących m.in.:

- opracowania technologii wzrostu rdzenia kwantowego lasera kaskadowego,
- opracowania technologii wzrostu warstw ograniczających lasera QCL,
- zastosowania opracowanej technologii elementów składowych kwantowego lasera kaskadowego w konstrukcjach przyrzędowych.

Słuszność tezy potwierdzają zatem analizy teoretyczne i badania eksperymentalne opisane w rozdziałach 7-11 rozprawy.

Autor rozwiązał postawione zadania, użył właściwych metod badawczych, a przyjęte założenia są merytorycznie uzasadnione.

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

Do najważniejszych oryginalnych osiągnięć Autora uznaję:

- zastosowanie opracowanej technologii elementów składowych struktury kwantowego lasera kaskadowego do wykonania laserów QCL o lepszych parametrach od dotychczas uzyskiwanych w Sieci Łukaszewicz – Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki. Uzyskanie 1,5-krotnego zmniejszenia prądu progowego (z 4 kA/cm² do 2,8 kA/cm²) oraz 7-krotnego wzrostu emitowanej mocy optycznej (z 350 mW do ponad 2,5 W) w laserach emitujących promieniowanie o długości fali 9 μm. Uzyskanie poprawy tych parametrów było możliwe dzięki zastosowaniu (do opracowanego w ITE rdzenia lasera QCL) opracowanych przez Autora warstw ograniczających (claddingów) osadzonych techniką LP-MOVPE,
- uzyskanie 1,5-krotnego zmniejszenia prądu progowego oraz wzrost emitowanej mocy optycznej do kilku watów w laserach emitujących promieniowanie o długości fali 4,7 μm,
- zastosowanie opracowanej przez Autora technologii grubych, wysokorezystywnych warstw InP:Fe do wytworzenia struktur zagrzebanych (*buried heterostructure*) - BH-QCL. Warstwami tymi zastąpiono klasycznie stosowaną izolację z Si₃N₄ oraz SiO₂. Dzięki temu, uzyskano dalsze zmniejszenie prądu progowego oraz napięcia pracy lasera QCL emitującego promieniowanie o długości fali 4,7 μm. Uzyskano również większą skuteczność odprowadzenia ciepła z obszaru rdzenia. Dzięki temu możliwe było około 50-krotne wydłużenie czasu trwania impulsu sterującego (z 200 ns do 10 μs), a zatem wzrost generowanej mocy optycznej lasera.

- przeprowadzenie badań nad nowatorską, wertykalną strukturą lasera kaskadowego. Otrzymano i przeprowadzono badania zwierciadeł Bragga na średnią podczerwień na bazie heterostruktury AlAs/GaAs oraz unikatowe zwierciadła na układzie materiałowym InGaAs/InP.

Znacząca część uzyskanych przez Autora wyników badań została pozytywnie zweryfikowana przez recenzentów czasopism naukowych z tzw. listy filadelfijskiej oraz spoza tej listy i materiałów konferencyjnych.

Przedstawione osiągnięcia są oryginalne, stanowiące samodzielny dorobek Autora i wnoszące nowe elementy do nauki reprezentowanej w literaturze światowej.

Polskie lasery QCL opracowane w Zespołach Profesorów M. Bugajskiego i M. Tłaczały znalazły już zastosowanie w wysokoczułych sensorach materii śladowej. Spełniają one również wymagania systemów łączności optycznej w otwartej przestrzeni (ang. *Free Space Optics*).

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

Recenzowana praca została napisana w sposób staranny i przekonujący. Układ pracy jest logicznie uzasadniony. Na szczególną uwagę zasługuje bardzo gruntowna analiza źródeł, zarówno krajowych jak i międzynarodowych, podanie metodyki badań i dyskusja otrzymanych wyników.

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

Jak w każdej rozprawie doktorskiej Autor nie ustrzegł się drobnych niedociągnięć edycyjnych, jednakże nie mają one wpływu na wysoką ocenę pracy.

Uwagi merytoryczne do dyskusji.

1. W heterostrukturach epitaksjalnych często stosuje się przedmuchy reaktora pomiędzy wzrostem warstw z różnych materiałów, w celu uzyskania „ostrych” interfejsów. Jest to szczególnie istotne w wypadku struktur o obniżonej wymiarowości. W rozprawie, w rozdziale 8 pt. „Opracowanie technologii struktur kwantowych”, wykazano, że w wypadku studni kwantowych InGaAs z barierami InP stosowanie przedmuchów (w czasie 5 s) jest niekorzystne i powoduje niejednorodność składu studni InGaAs, więc zastosowano procedurę wzrostu ciągłego. Natomiast, w opracowanej technologii supersieci oraz rdzenia lasera QCL (rozdział 9) na bazie heterostruktury InGaAs/ AlInAs wykazano, że korzystniejsze dla zachowania „ostrości” interfejsów było zastosowanie przedmuchów o długich czasach (10 s). *Proszę o precyzyjniejsze wyjaśnienie wpływu rodzaju osadzonej przez Pana heterostruktury na dobór odpowiedniej procedury wzrostu, gwarantującej uzyskanie, wymaganej w technologii laserów QCL, „ostrości” interfejsów.*
2. W pracy, w rozdziale 7 pt. „Opracowanie technologii warstw epitaksjalnych” oraz w rozdziale 8 pt. „Opracowanie technologii struktur kwantowych” optymalizowano m.in. temperaturę krystalizacji związków półprzewodnikowych InP, InGaAs i AlInAs, wchodzących w skład opracowywanej struktury epitaksjalnej lasera QCL. Temperatury te różniły się dla poszczególnych materiałów i wynosiły odpowiednio: 645°C, 635°C i 650°C. Docelową strukturę lasera kwantowego osadzono w temperaturze 645°C (wyższej niż optymalna dla InGaAs i niższej niż optymalna dla AlInAs). *Proszę o wyjaśnienie, dlaczego nie stosowano temperatur odpowiednich dla materiałów rdzenia lasera QCL (czy są to np. ograniczenia stanowiskowe) i czy nie wpłynęłoby to na uzyskanie lepszych parametrów struktur przyrządowych?*

3. W literaturze przedmiotu, w celu uzyskania mniejszych długości emisji lasera QCL na bazie heterostruktury InGaAs/AlInAs/InP, stosuje się rdzeń InGaAs/AlInAs z kompensacją naprężeń. Pan opracował technologię lasera z rdzeniem dopasowanym sieciowo do InP. Czy Pana zdaniem, wykonanie struktury epitaksjalnej lasera z kompensacją naprężeń wymaga istotnych zmian opracowanej przez Pana technologii?

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Wyniki badań przedstawione przez Autora rozprawy są wartościowe przede wszystkim z poznawczego punktu widzenia. Praca ma duże znaczenie praktyczne w dobie wytwarzania nowoczesnych źródeł promieniowania optycznego. Tego typu analizy mogą być niezwykle pomocne dla technologów tych przyrządów. Na podkreślenie zasługuje współpraca z Zespołami krajowymi i z Hiszpanii.

Uważam, że dalsze prace w tej dziedzinie powinny być kontynuowane. Wynikami tej pracy powinni zainteresować się badacze zajmujący się technologią laserów kaskadowych.

Na podkreślenie zasługuje również fakt, że doktorant publikował wyniki swoich prac w prestiżowych pismach z listy JCR takich jak: *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, *International Journal of Electronics and Telecommunications*, *Journal of Physics Communications*, *Photonics*, *Solid-State Electronics*, *Opto-Electronics Review*, *Optica Applicata* oraz *Material Science – Poland*.

Doktorant jest współautorem aż 12 publikacji z tej listy (w tym pierwszym autorem trzech prac), 42. publikacji spoza tej listy oraz 23. wystąpień konferencyjnych.

Na uwagę zasługuje fakt, że praca ta była możliwa była do wykonania w znanym nie tylko w kraju, ale i na świecie Zespole kierowanym przez Profesora Marka Tłaczałę.

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

Podsumowując, uważam, że rozprawa doktorska mgra inż. Mikołaja Badury spełnia wymagania formalne stawiane rozprawom doktorskim określone w art. 219 ust. 1 pkt 2b ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2021 poz. 478 z dnia 1 marca 2021 r.).

Ponadto stwierdzam, że rozprawa doktorska mgra inż. Mikołaja Badury stanowi oryginalne rozwiązania problemu naukowego i wskazuje na wysoki poziom wiedzy z dyscypliny automatyka elektronika i elektrotechnika, a także na umiejętność prowadzenia pracy naukowej przez Kandydata.

Biorąc pod uwagę wysoki poziom merytoryczny rozprawy doktorskiej mgra inż. Mikołaja Badury, a także aktywność naukową Kandydata, wyrażającą się publikacjami w prestiżowych czasopismach i prezentacjami referatów na renomowanych konferencjach wnoszą o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.



