

Łódź, 1 czerwca 2020 r.

Profesor dr hab. inż. Włodzimierz Nakwaski
Politechnika Łódzka
Instytut Fizyki
ul. Wólczańska 219
90-924 Łódź
Tel.: 602-631-011
e-mail: wlodzimierz.nakwaski@p.lodz.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Klaudii Hackiewicz
pt. „Analiza parametrów kaskadowych międzypasmowych
detektorów podczerwieni z supersieci II rodzaju”
złożonej do rozpatrzenia przez Radę Dyscypliny Naukowej
Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Wojskowej Akademii
Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego w dziedzinie „nauki
techniczne”, dyscyplina „elektronika”,
a przygotowanej pod kierunkiem promotora pułkownika dra hab.
inż. Piotra Martyniuka.

Recenzowana rozprawa doktorska Pani mgr inż. Klaudii Hackiewicz liczy 119 stron, 76 rysunków i równo 100 pozycji literatury. Składa się na nią 5 rozdziałów i spis użytej literatury. Poprzedza ją krótkie streszczenie, wykaz publikacji Autorki, spis treści i wykaz używanych w pracy akronimów.

Tematyka recenzowanej rozprawy doktorskiej, tj. opracowanie wytwarzania i zbadanie własności nowych wysokotemperaturowych, tj. pracujących w pobliżu bądź ponad temperatury pokojowej (300 K), detektorów podczerwieni o osiągnięciach lepszych od detektorów aktualnie stosowanych, jest od wielu już lat przedmiotem badań licznych grup badawczych. Dzieje się tak z uwagi na jej temat, istotny z punktu widzenia licznych jego zastosowań w nauce i technice, a wciąż nie rozwiązany w sposób adekwatny do jego znaczenia. Proponowane dla tych detektorów kolejne struktury foniczne wykazują wciąż tylko nieco lepsze własności od struktur poprzednich, ale wciąż nie w sposób umożliwiający ich powszechne zastosowanie – wciąż poszukiwana jest taka ich struktura, która będzie stanowić radykalne rozwiązanie detekcji promieniowania podczerwonego w wysokich temperaturach. Stanowi to jednoznaczne potwierdzenie aktualności tematyki rozprawy.

Autorka rozprawy, Pani mgr inż. Klaudia Hackiewicz, podjęła się zbadania możliwości zastosowania przy wytwarzaniu wysokotemperaturowych [typu HOT (*high operating temperature*)] detektorów promieniowania podczerwonego międzypasmowej detekcji

kaskadowej w supersieciach II rodzaju wytworzonych głównie w półprzewodnikach grupy $A^{III}B^V$. Znalezienie lepszych struktur umożliwiających wydajną detekcję promieniowania podczerwonego w temperaturach bliskich pokojowej jest obecnie sprawą niezwykle pilną. Aktualnie w takich detektorach HOT powszechnie stosowany jest materiał HgCdTe. Rozpatrując możliwość zastosowania do tego celu innych materiałów, Doktorantka przeprowadziła wnikliwą analizę teoretyczną, a później również doświadczalną, możliwości zastosowania przy wytwarzaniu detektorów typu HOT powyżej wymienionej nowoczesnej detekcji kaskadowej, a dokładniej - przeanalizowała, jak napisała w treści rozprawy, „wpływ technologii i konstrukcji międzypasmowych detektorów kaskadowych podczerwieni na ich parametry detekcyjne”. I ta właśnie analiza i jej praktyczne zastosowanie jest treścią recenzowanej rozprawy, o czym jednoznacznie pisze w jej rozdziale 1.3.

Recenzowaną rozprawę rozpoczyna wprowadzenie, którego rola w rozprawach doktorskich jest dwójaka: po pierwsze - stanowi potwierdzenie znajomości tych zagadnień przez Doktoranta, a po drugie – prezentuje ich podstawy teoretyczne w sposób umożliwiający odnośnienie się do nich w dalszych częściach rozprawy bez konieczności przerywania prowadzonego w niej toku rozumowania, tj. pozwala używać we właściwej treści rozprawy przedstawionych we wprowadzeniu pojęć, zależności, czy też rysunków. Autorka zastosowała w Swej rozprawie doktorskiej bardzo obszerne wprowadzenie opisujące w interesujący i wyczerpujący sposób podstawowe parametry detektorów podczerwieni, technologiczne metody ich wytwarzania oraz stosowane materiały przy ich produkcji. Ponadto opisała model wzorcowego fotonowego detektora podczerwieni oraz przedstawiła zasadę działania znanych do tej pory detektorów typu HOT. Wprowadzenie kończy się przedstawieniem celu i zakresu pracy, co wyjaśniłem już powyżej.

Podstawę działania i własności analizowanych w rozprawie międzypasmowych struktur kaskadowych przedstawiła Doktorantka w jej następnym rozdziale. Do niedawna wszystkie półprzewodnikowe przyrządy, których działanie jest oparte na emisji bądź absorpcji promieniowania, wykorzystywały do tego celu przejścia typu pasmo-pasmo, tj. między stanami w pasmie przewodnictwa i stanami w pasmie walencyjnym (bądź odwrotnie). Stąd energia emitowanego bądź absorbowanego w takim przyrządzie promieniowania była bezpośrednio związana z szerokością przerwy energetycznej jego obszaru czynnego, co znacząco ograniczało aplikacyjne możliwości przyrządu uzależniając je od tej szerokości w dostępnych półprzewodnikach. Jak wiadomo, strukturę pierwszego lasera nowego typu, emitującego promieniowanie będące wynikiem przejść między dyskretnymi stanami energetycznymi studni kwantowej, zwanego kwantowym laserem kaskadowym (*quantum-cascade semiconductor laser - QCL*), zaprezentowali J. Faist i in. w 1964 roku w AT&T Bell Laboratories. Doktorantka opisała we właściwy sposób tę pierwszą w ogóle konstrukcję półprzewodnikowego lasera kaskadowego. Wyjaśniła, że w pewnych dość istotnych granicach, można było jej użyć do zaprojektowania unipolarnego lasera emitującego promieniowanie o z góry zadanej długości fali niezależnie od przerwy energetycznej zastosowanego półprzewodnika, co jest ogromną zaletą tej struktury. Długość fali emitowanego przez takie lasery promieniowania zależy od geometrycznych parametrów studni kwantowej, które można zapewnić technologicznie. Doktorantka zauważyła, że lasery te wymagały użycia stosunkowo wysokich napięć zasilania, lecz ten niedostatek był z nadwyżką skompensowany przez istotną zaletę tych laserów, tj. emisji przez pojedynczy elektron wielu fotonów promieniowania podczas wielu jego przejść emisyjnych. Szkoda tylko, że nie dostrzegła, że funkcje kwantowe stanów energetycznych idealnej studni kwantowej są ortogonalne, czyli formalnie przejścia kwantowe między nimi są

w takiej idealnie prostokątnej studni zabronione. Jak jednak wiadomo, przyłożenie do przyrządu napięcia zasilającego powoduje pewną deformację kształtu potencjału studni kwantowej niwecząc ortogonalność jej stanów związanych. Tym niemniej prawdopodobieństwo przejść wewnątrzpasmych jest zdecydowanie niższe niż w przypadku przejść międzypasmych.

W kolejnych podrozdziałach rozdziału drugiego rozprawy jej Autorka skupiła się nad drugą strukturą lasera kaskadowego, tj. międzypasmych lasera kaskadowego, czyli lasera ICL (*interband cascade laser*). Pozornie jest on podobny do rozpatrywanego wcześniej lasera QCL, różni się jednak zasadniczo rodzajem stosowanych w nim przejść kwantowych, które, w odróżnieniu od stosowanych w laserach QCL przejść wewnątrzpasmych między stanami studni kwantowej, zachodzą w laserach ICL między stanami w obu pasmach dozwolonych półprzewodnika. W efekcie, jak zauważyła Autorka rozprawy, prąd progowy lasera ICL jest znacząco niższy niż to jest w laserach QCL dzięki znacznie szybszemu rozpraszaniu fononowego podczas przejść pasmo-pasmo w laserach ICL niż to jest w przypadku niepromienistych przejść wewnątrzpasmych lasera QCL.

Niewątpliwe zalety laserów kaskadowych zachęciły konstruktorów detektorów promieniowania do zastosowania również w nich wielce obiecujących kaskadowych struktur półprzewodnikowych. Zasadę działania typowego międzypasmych kaskadowego detektora podczerwieni Autorka rozprawy wyjaśniła dogłębnie na rysunku 13. Dzięki zastosowaniu w tej strukturze właściwie pochylonego profilu pasmych (*tilted-band profile*), krawędź pasma przewodnictwa w obszarze relaksacji znajduje się z jednej jego strony blisko krawędzi pasma przewodnictwa obszaru absorbera, natomiast z drugiej strony - blisko wierzchołka pasma walencyjnego absorbera kolejnego stopnia kaskady. W ten sposób elektrony wzbudzone do pasma przewodnictwa absorbera przez padający kwant promieniowania mogą rekombinować z dziurami generowanymi w następnym stopniu kaskady. W rezultacie ten sam elektron może być wielokrotnie wykorzystany w procesach absorpcji promieniowania w kolejnych stopniach kaskady, co Autorka rozprawy wyjaśniła niezwykle poglądowo (choć przydałoby się dodać trochę wyjaśnień w podpisie dość skomplikowanego rys. 13).

Rozdział trzeci Swej rozprawy jej Autorka poświęciła teoretycznej analizie parametrów międzypasmych detektorów podczerwieni, a głównie międzypasmych detektora wykorzystującego heterozłączone supersieci II rodzaju InAs/GaSb, przy użyciu modelu Hinkey'a i Yanga. W podrozdziale 3.1. Doktorantka przedstawiła uproszczony analityczny model transportu elektronowego w analizowanym międzypasmych detektorze podczerwieni. Stosując zrozumiałe w takim modelu uproszczenia otrzymała cały szereg interesujących analitycznych zależności opisujących przebieg powyższego transportu, np. na sprawność (czy też – wydajność, jak pisze Doktorantka) kwantową w pojedynczym oraz w ogólnym m -tym stopniu kaskady, gęstość prądu ciemnego, kwadrat prądu śrutowego, wykrywalność i inne. Użyteczność otrzymanych przez Autorkę rozprawy przybliżonych zależności zależy od ich zgodności ze stanem faktycznym, co w praktyce znaczy – zgodności z właściwie dokonanymi pomiarami tych wielkości. Doktorantka w tym celu powołała się na eksperymentalne wyniki opublikowane w 2016 roku w *Journal of Applied Physics* przez Lei i in. (poz. 82 ze spisu literatury zamieszczonego w Jej rozprawie), choć Sama stwierdza, że cytowany tam detektor nie spełnia w pełni stosowanych przez Nią założeń. Tym niemniej z uznaniem zauważyłem pokazane na kolejnych rysunkach interesujące wyniki prowadzące do optymalizacji struktury badanego detektora. W ostatnim podrozdziale rozdziału 3 Doktorantka przedstawiła

porównanie wyników Swojej nieco przybliżonej symulacji z danymi literaturowymi. Na rysunku 33 dowiodła pewnej zgodności wyznaczonych przez Siebie wykrywalności z wynikami pomiarów opublikowanych w 2017 roku również przez Lei i in. (poz. 76 z powyższego spisu), choć ta zgodność nie wydaje się być w pełni jednoznaczna. W poczuciu więc pewnego niedosytu przystępuję do zaznajomienia się z rozdziałem 4 rozprawy.

Treścią rozdziału 4 jest, zgodnie z jego tytułem, opis wyznaczania parametrów międzypasmowego detektora podczerwieni. Jak wynika z treści tego bardzo obszernego rozdziału, Doktorantka dokonała tego (z pewnymi zastrzeżeniami opisanymi poniżej) korzystając kolejno ze wspólnego laboratorium Wojskowej Akademii Technicznej i firmy Vigo System S. A. z oprogramowaniem UMRecord (pomiaru charakterystyk elektrycznych), spektrofotometra Fouriera Newport 80250 w tymże laboratorium (pomiaru charakterystyk widmowych), oscylatora parametrycznego OPO w laboratorium Zakładu Fizyki Ciała Stałego w WAT (pomiaru szybkości odpowiedzi) oraz wzmacniacza transimpedancyjnego Signal Recovery 5182 w laboratorium Katedry Podstaw Elektroniki Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej (pomiaru szumów).

Powyższym pomiarom poddano struktury międzypasmowego detektora podczerwieni w układzie typu „*equal absorbers*”, tj. w przypadku identycznych stopni kaskady (w szczególności o jednakowej grubości), bądź typu „*matched absorbers*”, czyli w kaskadzie o jednakowej wydajności kwantowej każdego absorbera, czego dokonuje się stosując najcieńszy pierwszy stopień kaskady, a następnymi stopniowo coraz grubsze. Badane struktury w pierwszym przypadku były wykonane metodą epitaksji z wiązek molekularnych (metoda MBE – *molecular-beam epitaxy*) w Center for High Technology Materials, University of New Mexico, Albuquerque, USA. Struktury te poddano bardzo kompleksowym badaniom o wręcz imponującym zakresie otrzymując całe mnóstwo trudnych nawet do wymierzenia interesujących danych pomiarowych w szerokim zakresie temperatury (200 K - 380 K), napięcia zasilania, długości fali absorbowanego promieniowania, częstotliwości szumu i innych. W szczególności dowiedziono, że prąd ciemny badanego detektora kaskadowego maleje ze wzrostem liczby stopni w kaskadzie, wyznaczono doświadczalnie szerokość przerwy energetycznej warstwy absorpcyjnej, potwierdzono poprawę szybkości odpowiedzi ze wzrostem napięcia zasilającego oraz wykazano, że szum o niskiej częstotliwości zawiera szum niskoczęstotliwościowy $1/f$ i szum generacyjno-rekombinacyjny. Ponadto dowiedziono, że jakość podłoża ma silniejszy niż się ogólnie spodziewano wpływ na działanie badanego detektora.

W następnym obszernym podrozdziale rozprawy podano analogiczne wyniki pomiarów dotyczących podobnego do rozpatrywanego powyżej fotodetektora, tym razem jednak w układzie typu „*matched absorbers*”. Poddane pomiarom warstwy były w tym wypadku wykonane również metodą MBE na niedomieszkowanych podłożach GaSb typu p w School of Electrical and Computer Engineering, University of Oklahoma w Norman w stanie Oklahoma przy użyciu Veeco GENxplor. Również w tym przypadku przedstawiono w rozprawie zdumiewającą ilość otrzymanych interesujących wyników eksperymentalnych.

We wnioskach końcowych Doktorantka wyraźnie podkreśliła dwie istotne zalety międzypasmowych detektorów kaskadowych, to jest możliwość stosowania cieńszych absorberów, co zapewnia zgromadzenie niemal wszystkich wzbudzonych nośników przed ich rekombinacją, oraz redukcję prądów ciemnych ze wzrostem liczby kaskad. Jej zdaniem

sprawności kwantowe są zwykle wyższe dla struktur typu „*matched-absorbers*”, choć staje się to wątpliwe w przypadku struktur gorszej jakości. Ponadto struktury tego typu są znacznie trudniejsze technologicznie. Eksperymentalna część pracy potwierdziła wyniki badań symulacyjnych.

Recenzowana rozprawa jest napisana w formie bezosobowej: wykonano, obliczono, porównano itp. Rozprawa doktorska nie jest publikacją w ścisłym tego słowa znaczeniu. Referuje się przecież w niej wyniki uzyskane indywidualnie przez Doktoranta. Jest więc bardzo istotnym wyrażnie podkreślenie, które części prezentowanego materiału były bezspornie uzyskane indywidualnie przez Niego/Nią, choć jest sprawą zrozumiałą, że mogą one niekiedy stanowić część wyników uzyskanych przez cały zespół. Ale niezbędne jest wyróżnienie tych wyników, które zostały przez Doktorantkę uzyskane indywidualnie. Dlatego uważam, że właściwym jest opis takich wyników w I osobie liczby pojedynczej (nawet wtedy, gdy cała pozostała treść rozprawy jest napisana bezosobowo), co niestety jest rzadko stosowane w polskich rozprawach doktorskich. Cała recenzowana rozprawa jest konsekwentnie pisana bezosobowo, co powoduje, że niezwykle trudno jest recenzentowi zidentyfikować bezsporne indywidualne osiągnięcia Doktorantki. Niekiedy w takich przypadkach pomaga mu wcześniejsze opublikowanie przez Autorkę części wyników. Niestety w rozpatrywanym przypadku cytowane w treści rozprawy publikacje Autorki (pozycje 11, 28, 29, 30, 31 i 96) dotyczyły ogólnej informacji o supersieciach wykonanych z InAs i GaSb ([11]), wyboru wartości parametrów materiałowych ([11] i [28-31]) oraz zastosowania zintegrowanej z detektorem soczewki ([96]). I dlatego przedstawiony przeze mnie powyżej opis wyników prezentowanych w rozprawie też napisałem w formie bezosobowej. Na szczęście istnieją jeszcze inne metody sprawdzenia oryginalności indywidualnych osiągnięć Doktorantki.

Minęły już czasy prowadzenia całkowicie indywidualnych badań naukowych, jak to było powszechne przed laty. Obecnie takie badania są wykonywane w zespołach badawczych, często bardzo licznych, a ich efektem są wieloautorskie publikacje. Zawsze jednak w takim zespole konkretnym realizowanym zadaniem badawczym kieruje mniejsze grono osób, każde konkretne badanie naukowe ma swojego lidera. O takiej pozycji dowodzi miejsce na liście autorów danej publikacji, lider takich badań jest zwykle wymieniany jako pierwszy jej autor. W załączonym do rozprawy spisie publikacji Pani mgr inż. Klaudia Hackiewicz aż dziesięciokrotnie jest ich pierwszym autorem w tym w tak znaczących czasopismach naukowych, jak *Acta Phys. Pol. A*, *Opt. Eng.*, *Infrared Phys. Technol.*, *Opt. Quantum Electron.*, i *IEEE J. Quantum Electron.* Świadczy to jednoznacznie o Jej dominującej roli w tych badaniach. Wszystkie te prace były poświęcone różnym aspektom fizyki międzypasmowych detektorów kaskadowych analizowanych w rozprawie. Dotarłem do treści niektórych z tych publikacji. Niewątpliwie są one poświęcone badaniom stanowiących treść recenzowanej rozprawy doktorskiej, choć ich treść nie jest z nią tożsama. Świadczą więc one dodatkowo o oryginalności recenzowanych badań i o ich niewątpliwie wysokiej jakości, a pozycja pierwszej autorki dowodzi dominującego udziału Doktorantki w tych badaniach.

Pragnę wyraźnie podkreślić ponadprzeciętny poziom edycyjny recenzowanej rozprawy. Jest ona napisana dobrą polszczyzną, wyśmienitym stylem, nie dostrzegłem żadnych istotnych błędów językowych czy stylistycznych, tym bardziej ortograficznych. Podkreśleniu jest też wart wzorowy układ rozprawy i jej podział na kolejne rozdziały. Rozprawę czyta się z przyjemnością. Choć można mieć zastrzeżenia do zbyt wstrzemięźliwego odwoływania się w treści rozprawy do wcześniejszych publikacji Doktorantki, co nieco utrudniało pracę

recenzenta. Poza tym w rozprawie doktorskiej w spisie publikacji powinni być wymienieni wszyscy jej autorzy.

W konkluzji pragnę jednoznacznie stwierdzić, że recenzowana rozprawa doktorska Pani mgr inż. Klaudii Hackiewicz dowodzi samodzielnego rozwiązania przez Nią niezwykle aktualnego problemu naukowego. Jest nim opracowanie metody wytwarzania oraz zbadanie własności nowych wysokotemperaturowych detektorów podczerwieni o osiągnięciach lepszych od detektorów aktualnie stosowanych. Do tym celu zaproponowała wykorzystanie międzypasmowej detekcji kaskadowej w supersieciach II rodzaju. Realizując to zamierzenie badawcze Doktorantka dowiodła umiejętności planowania nowoczesnych badań naukowych, doboru właściwych teoretycznych i eksperymentalnych metod badawczych, wyciągania z ich wyników odpowiednich wniosków oraz właściwej ich prezentacji. Ponadto dowiodła Swej ogólnej wiedzy dotyczącej fizyki działania półprzewodnikowych przyrządów optoelektronicznych. Biorąc to pod uwagę jednoznacznie stwierdzam, że oceniana rozprawa spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim zgodnie z art. 13 ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65/03, poz. 595 z późniejszymi zmianami). Przeto wnoszę o dopuszczenie Pani mgr inż. Klaudii Hackiewicz do publicznej obrony. Ponadto, biorąc pod uwagę wysoki poziom merytoryczny rozprawy oraz imponujący zakres przeprowadzonych przez Doktorantkę badań eksperymentalnych, wnioskuję o wyróżnienie Jej rozprawy doktorskiej.

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'K. Hackiewicz', written in a cursive style.