

dr hab. inż. Marcin Motyka, prof. uczelni
Katedra Fizyki Doświadczalnej
Wydział Podstawowych Problemów Techniki
Politechnika Wrocławska

Wrocław, 04.06.2020

Recenzja Rozprawy Doktorskiej pt. „Analiza parametrów kaskadowych międzypasmowych detektorów podczerwieni z supersieci II rodzaju”

Autor rozprawy: mgr inż. Klaudia Hackiewicz

Promotor: płk dr hab. inż. Piotr Martyniuk, prof. WAT

Praca dotyczy zarówno modelowania jak i przeprowadzenia badań spektroskopowych mających na celu wyznaczenie parametrów optycznych i elektrycznych międzypasmowych detektorów kaskadowych. Podjęta w pracy tematyka jest bardzo aktualna. Wysokotemperaturowe a zarazem wydajne detektory podczerwieni znajdują coraz to nowsze obszary zastosowań chociażby w szeroko rozumianej optycznej detekcji gazów. W tego rodzaju systemach detekcji niezwykle ważnym aspektem jest możliwość stosowania źródeł jak i detektorów, które nie wymagają substancji chłodzących (kriogenicznych), które to znacznie ograniczają zakres ich stosowalności w systemach zdalnych i praktycznie bezobsługowych.

Dysertacja obejmuje 119 stron w tym dwie strony związane z dorobkiem autorki oraz siedem stron zawierających odnośniki literaturowe (100 pozycji). Po krótkim streszczeniu oraz wymaganym „abstrakcie” odnajdujemy spis treści oraz użyteczny wykaz akronimów. Część kolejna to wprowadzenie do tematyki podczerwieni podzielona na podrozdziały. Pierwszy z nich to wprowadzenie historyczne do tematyki podczerwieni i pierwszych wielkości fizycznych zdefiniowanych przy badaniach nad ciałem doskonale czarnym. Dalej mamy zdefiniowanie okien transmisyjnych atmosfery w trzech zakresach szczególnych tj. średniej długofalowej i dalekiej podczerwieni w przedziałach długości fal często promowanych przez eksperta w dziedzinie czyli Profesora Antoniego Rogalskiego. Kolejny podrozdział przedstawia ewolucję idei detektorów a w szczególności architektury ich obszaru czynnego, gdzie autorka przechodzi przez coraz bardziej zaawansowane konstrukcje od detektorów termicznych przez supersieci półprzewodnikowe do detektorów nadprzewodzących i wykorzystujących systemy niskowymiarowe typu kropki kwantowe.

Podrozdział 1.2.1 to wprowadzenie do zasadniczej części pracy, znajdujemy tu model numeryczny detektora zakładający oddziaływania fali elektromagnetycznej z obszarem czynnym z uwzględnieniem procesów rekombinacyjnych jak i relaksacyjnymi czy rozproszeniowymi typu np. procesów Augera. Podrozdział zawiera także wprowadzenie wielu istotnych wielkości takich jak widmowa czułość prądowa, wykrywalność znormalizowana i wiele innych niezbędnych do prawidłowego modelowania pracy detektorów. Kolejny podrozdział uważam za bardzo istotny i starannie przygotowany. Dotyczy on opisu różnych typów materiałów w kontekście użycia ich w odpowiednich zakresach spektralnych z uwzględnieniem zalet i wad. Czytelnik jest prowadzony od warstw HgCdTe przez supersieci InAs/GaSb do skomplikowanych układów kwantowych. Dowiadujemy się, które z materiałów bądź ich modyfikacji miały wpływ na redukcję defektów czy też czasów życia nośników a w konsekwencji wpływ między innymi na wartość prądów ciemnych i wydajność kwantową. Podkreślę, iż podrozdział wraz z kolejnym, który wprowadza czytelnika w zagadnienia dotyczące detektorów wysokotemperaturowych są napisane sumiennie z szeroko podanym materiałem literaturowym. Zwieńczeniem rozdziału jest zdefiniowanie celów postawionych w niniejszej pracy.

Rozdział drugi to opis głównej idei pracy. Początek zaczyna się rysem historycznym na temat wykorzystania systemu kaskad kwantowych w tzw. kwantowych laserach kaskadowych. Opis ten zawiera szczegółowe informacje o tunelowaniu nośników między warstwami i generacji promieniowania. Dalej temat jest rozwijany o problematykę wykorzystania systemu kaskadowego zarówno do tunelowania elektronów jak i dziur co ma miejsce w tzw. międzypasmowych laserach kaskadowych. W pracy twierdzi się, iż tego rodzaju struktura zaproponowana przez Rui Yanga w 1994 do wydajnej emisji jest także potencjalnym kandydatem do zastosowań detekcyjnych. Jest to wynikiem połączenia systemu kaskad a co za tym idzie zmniejszenia strat omowych, z pożądanym długim czasem przejść optycznych zachodzących między pasmami, czyli w konsekwencji możliwością wytwarzania detektorów o podwyższonej temperaturze pracy. Rozdział kończy się szczegółowym opisem schematów detektorów tzw. ICIP wykorzystujących wspomniany wcześniej system kaskad o nieciągłości pasm typu II w dwóch konfiguracjach, które są potem badane.

Pozostałe dwa rozdziały są sednem rozprawy. Rozdział trzeci zawiera w pierwszej kolejności informacje o metodologii prowadzonych obliczeń a w szczególności założeń, które zostały poczynione, oraz informacji o procesach, które nie zostały uwzględnione w symulacjach transportu nośników. W kolejnym kroku przedstawiono szczegółowy opis transportu elektronowego a następnie wykonano szereg modyfikacji obszaru ICIP zaproponowanego przez Hinkey'a i Yang'a w 2013 roku.

Zbadano wpływ grubości absorbera na wydajność kwantową dla różnej liczby stopni w kaskadzie, wykazując potrzebę zastosowania zmiennej grubości absorbera. Ponieważ grubość pierwszego absorbera wpływa na wartości pozostałych wykonano odpowiednie obliczenia co przedstawione zostało na wykresie 22. Dalej zasymulowano wartość wydajności kwantowej w funkcji grubości absorbera dla przypadków ze stałym L i zmiennym N_s , i odwrotnie ze stałym N_s i zmiennym L . Optymalne wartości zebrano na koniec w tabeli definiując parametry zoptymalizowanej architektury. Dalsze kroki to modernizacje skupione na optymalizacji wykrywalności zamieszczonych na wykresach 24-30 zakończone interesującą dyskusją podsumowującą uzyskane rezultaty z danymi literaturowymi. Należy jednak stwierdzić, iż badane układy wymagają jeszcze sporej modernizacji celem osiągnięcia porównywalnych a przynajmniej akceptowalnie słabszych parametrów od detektorów opartych na HgCdTe.

Rozdział czwarty zaczyna się od wprowadzenia do technik pomiarowych jakie były użyte w celu charakteryzacji badanych struktur detekcyjnych. Opisane zostają tu liczne stanowiska pomiarowe dla takich eksperymentów jak na przykład pomiar charakterystyk prądowo-napięciowych, pomiar szybkości odpowiedzi, pomiar szumów niskoczęstotliwościowych, czy wreszcie pomiar charakterystyk spektralnych. Dalej następuje opis kilku badanych struktur ICIP tzw. „equal absorbers”, wytworzonych w zaprzyjaźnionym ośrodku Centr for High Technology Materials, University of New Mexico w Albuquerque. Przedstawiono schematy badanych próbek osadzanych na różnych podłożach przy użyciu kilku różnych liczb kaskad oraz zróżnicowanym domieszkowaniem warstw kontaktowych w kolejnych analizowanych detektorach. Badania zaczęto od pozyskania charakterystyk prądowo napięciowych dla kilku temperatur celem wyznaczenia energii aktywacji oraz czasów życia nośników. Podsumowaniem tej części jest stwierdzenie, iż prąd ciemny maleje wraz ze wzrostem ilości stopni w kaskadzie. Następnie analizowane są charakterystyki spektralne również dla kilku interesujących temperatur, co kończy się wyznaczeniem parametrów Varshniego. Bardzo interesującą częścią pracy są następnie prezentowane rezultaty badań szybkości odpowiedzi oraz charakterystyk szumowych badanych detektorów. Część tą należy podsumować stwierdzeniem, iż przeprowadzone liczne pomiary pozwalają powiązać szum niskoczęstotliwościowy detektora kaskadowego z absorberem InAs/GaSb z szumem $1/f$ oraz szumem generacyjno-rekombinacyjnym. Zakończenie tej części rozdziału to badania nad wpływem podłoża na charakterystyki detektorów. Tu trzeba stwierdzić, iż rodzaj podłoża ma znaczący wpływ na parametry detekcyjne przyrządu oraz jak twierdzi doktorantka jest to spowodowane głównie niedopasowaniem sieciowym skutkującym pojawiającymi się dyslokacjami. Ważna konkluzja to również stwierdzenie, że dla ICIP osadzanych

na GaAs wykrywalność pogarsza się w stosunku do tych osadzonych na GaSb, co może być skompensowane zastosowaniem soczewki immersyjnej.

Rozdział 4.3 zawiera rezultaty podobnych badań jak wcześniej opisane w rozdziale 4.2 tylko, że zrealizowane dla innego typu detektorów ICIP tzw. „matched absorbers”. Tu pozwolę sobie skupić uwagę na części badań nad szybkością odpowiedzi i naturą szumów w badanych detektorach. Badając szereg detektorów z różną liczbą kaskad stwierdzono, iż to detektor z ośmiostopniową kaskadą uzyskuje najkrótszy czas odpowiedzi a ponadto zastosowanie kaskad skróciło ten czas 10-krotnie w stosunku do porównywalnego detektora bez stosowania kaskad. Podobne wnioski płyną z analiz szumowych, gdzie gęstość mocy szumu maleje ze wzrostem liczby kaskad, co potwierdza możliwość stosowania ICIP w systemach wymagających zwiększonej temperatury pracy.

W podsumowaniu znajdujemy trzystronicowy spójny opis otrzymanych wyników, jak również cenną informację na temat bliskiej współpracy doktorantki i zespołu profesora Piotra Martyniuka z firmą Vigo. Znamianuje to oczywiście, iż przedstawiane rezultaty w zakresie struktur kaskadowych mogą być realnie optymalizowane i wdrażane. Podsumowanie zakończone jest stwierdzeniem, że w pracy wykazano, iż międzypasmowe detektory kaskadowe z supersieci II rodzaju posiadają właściwości pozwalające na zastosowanie ich w układach pracujących w temperaturach wyższych niż pokojowa. Analizując rezultaty tej pracy w szczególności w części eksperymentalnej, mogę powiedzieć, iż stwierdzenie to jest uprawnione i postawiona teza pracy została udowodniona.

Przedstawiona rozprawa jest systematyczną analizą zjawisk fizycznych zachodzących w kwantowych systemach detekcji światła przeznaczonych do pracy w podczerwieni. Na szczególną uwagę zasługuje jej komplementarność jaką obserwuje się między częścią obliczeniową a eksperymentalną udokumentowaną niezwykle dużą ilością materiału badawczego. Część obliczeniowa to ok. 15 wykresów symulacji a część pomiarowa to ponad 30 wykresów. Praca na pewno spełnia kryteria stawiane dysertacjom w naukach ścisłych czy technicznych, niemniej jednak obowiązek recenzenta nakazuje doprecyzować nieścisłości, wytknąć jej słabsze strony i zadać kłopotliwe pytanie, co następuje poniżej:

- i. Do obliczeń numerycznych wybrano model struktury zaproponowanej przez Hinkey'a, można było dodać zdanie uzasadnienia dlaczego akurat ten konkretny.
- ii. Z podanej informacji w rozdziale czwartym o tym, iż proces wytworzenia „mesy” i naparowania złotych kontaktów został wykonany w Zakładzie Fizyki Ciała Stałego WAT nie wynika czy doktorantka brała udział w tych czynnościach. Podobnie rzecz się ma w kwestii

pomiarów szumowych realizowanych na Politechnice Rzeszowskiej. Czy doktorantka zanalizowała dane czy może uczestniczyła w jakimś fragmencie tych pomiarów?.

- iii. W części teoretycznej przydałaby się informacja o warsztacie z jakiego Pani magister korzystała. Czy mamy do czynienia z komercyjnie dostępnym oprogramowaniem, czy z programem wypracowanym w grupie czy może z własnych skryptów/programów (tu pewnie słowo o użytych metodach numerycznych można by wtrącić).
- iv. Na rysunku 47 przedstawiono procedurę wyznaczenia czasu życia za pomocą modelowania danych linią trendu. Brak tu informacji o współczynniku korelacji. Przeprowadzenie tej procedury dla przedstawionych dwóch pozostałych czasów wydaje się również możliwe i zachodzi pytanie o dokładność wyznaczenia czasu 108 ns. Tu zdaję sobie sprawę, że ten sposób wyznaczania czasu życia nośników to trudne i kłopotliwe zagadnienie.
- v. Strona 79. „Wyniki eksperymentalne nie różnią się znacząco od obliczonych teoretycznie”. Pytanie co to stwierdzenie oznacza w kontekście podanej wcześniej informacji o tym, iż zastosowany model nie uwzględnia procesów tunelowania (strona 78 szósta linia od dołu strony)?
- vi. Strona 98. Brak próby wyjaśnienia, dlaczego stosowanie soczewki immersyjnej na strukturach osadzanych na GaSb działa zdecydowanie gorzej niż na strukturach osadzanych na GaAs. Właściwości detekcyjne bez soczewek w szczególności w niskich temperaturach wydają się być lepsze w detektorach osadzonych na GaSb.
- vii. Strona 102. Rysunek 69 zawiera cztery krzywe z których jedna jest gładka a pozostałe dziwnie oscylują. Nie ma wyjaśnienia czy to efekt fizyczny czy aparaturowy?
- viii. W podsumowaniu pojawia się temat przyszłościowej kombinacji materiałów InAs/InAsSb ze względu na dłuższy czas życia nośników w tym układzie. W omawianych w części drugiej laserach ICL pojawiło się rozwiązanie zastosowania kombinacji warstw InAs/GaAsSb co zmieniło charakter naprężenia i w konsekwencji naturę podstawowego przejścia międzypasmowego z ciężko-dziurowej na lekko-dziurową. To prowadzi do możliwości wytworzenia polaryzacyjnie niezależnych laserów w podczerwieni. Pytanie jak ewentualnie mogło by wyglądać zastosowanie takiego układu w detektorach kaskadowych? Czy manipulacja „przekryciem” funkcji falowych również nie wpłynęłoby na wydłużenie czasów życia nośników. Czy poziomy lekko dziurowe nie sprawiłyby się lepiej w procesie tunelowania?
- ix. W pracy wyniki własne nie są powiązane odnośnikami z publikacjami autorki wymienionymi w dorobku. Nie wiadomo co jest częścią doktoratu a co dokładnie zostało opublikowane.

- x. W podsumowaniu jest zawarta informacja o współpracy doktorantki z firmą czyli można wnioskować, że była również zaangażowana w grantach, ale w dorobku trochę brakuje wyszczególnienia w jakich konkretnie.
- xi. „Wykaz konferencji naukowych” trzeba domyślnie odczytywać, że jest to wykaz konferencji, w których Pani magister uczestniczyła, ale brak informacji o charakterze wystąpienia.

W mojej recenzji stwierdzam, że Pani mgr inż. Klaudia Hackiewicz opanowała w stopniu bardzo dobrym warsztat modelowania teoretycznego struktur detektorów kaskadowych. Przeanalizowała wiele istotnych wyników eksperymentalnych wzbogacając wiedzę eksperymentalną w związku z wykorzystaniem wielu technik pomiarowych przedstawionych w tej pracy. W szczególności wartościowe wydają się dokonane optymalizacje kaskad w części teoretycznej oraz badania czasów odpowiedzi i szumów detektorów w części eksperymentalnej. O znaczeniu wyników i dojrzałości naukowej Pani Hackiewicz stanowi dodatkowo Jej spory dorobek naukowy, na który składa się szesnaście artykułów zarówno pokonferencyjnych jak i tych regularnych, publikowanych w solidnych czasopismach rozpoznawanych dla różnych dziedzin nauki. Są to publikacje zarówno z zakresu fotoniki, optoelektroniki jak i fizyki detektorów, w których w kilku przypadkach Pani magister jest pierwszym autorem (na przykład Infrared Physics and Technology oraz IEEE Journal of Quantum Electronics).

Wymienione wcześniej niejasności oraz moje drobne rozterki nie mają jednak wpływu na ostatecznie bardzo pozytywną ocenę całej rozprawy. Praca w jej merytoryce wnosi nowe aspekty w dziedzinie fizyki detektorów podczerwieni, zawierając oryginalne dane na temat poprawy parametrów pracy detektorów wykorzystujących układy kwantowe z supersieci typu II. Dysertacja, bogata w liczne wyniki eksperymentalne wnosi swój wkład w fizykę podczerwieni i spełnia w mojej ocenie zarówno zwyczajowe jak i ustawowe wymagania stawiane pracom doktorskim. Wnioskuje o dopuszczenie pracy doktorskiej mgr inż. Klaudii Hackiewicz do publicznej obrony. Ponadto, w przypadku jej pozytywnej obrony sugeruję rozważenie głosowania w sprawie jej wyróżnienia.

Marcin Motyka

