

Warszawa, 8.01.2018

Prof. dr hab. Maciej Bugajski  
Instytut Technologii Elektronowej  
Al. Lotników 32/46  
02 668 Warszawa

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Michała Kozuba pt. „Investigation into properties of indium arsenide films with respect to the emission of terahertz radiation”**

Rozprawa doktorska mgr Michała Kozuba dotyczy metod generacji promieniowania terahercowego w cienkich warstwach InAs. Nowatorstwo badań Autora polega na zaproponowaniu metody poprawy wydajności generacji promieniowania terahercowego w wymienionych strukturach. Autor stawia hipotezę, że jest to możliwe dzięki wytworzeniu w dolnej części warstwy InAs silnie domieszkowanego reflektora, pozwalającego na wielokrotne odbicia generowanego promieniowania wewnątrz struktury. W wyniku zsumowania kolejnych wiązek należy spodziewać się wzrostu natężenia promieniowania emitowanego na zewnątrz struktury w stosunku do natężenia promieniowania emitowanego przez proste warstwy n-InAs i p-InAs wzbudzone femtosekundowymi impulsami laserowymi. Dla udowodnienia tej tezy przeprowadzone zostały kompleksowe badania eksperymentalne, na które składały się: wytworzenie metodą epitaksji z wiązek molekularnych (MBE) odpowiednich struktur, pomiary koncentracji nośników metodą Halla i różniczkowego odbicia w podczerwieni i pomiary emisji ze specjalnie zaprojektowanych przetworników fotoprzewodnościowych metodą spektroskopii w domenie czasowej. Praca ma charakter eksperymentalny i dotyczy zagadnień należących do aktualnej tematyki badawczej o dużym znaczeniu dla nauk podstawowych i zastosowań.

OMÓWIENIE PRACY

Rozprawa składa się z 7 rozdziałów, 2 dodatków i bibliografii. Rozdział 1 i 2 stanowią wprowadzenie w tematykę pracy. Rozdział 3 poświęcony jest zaprezentowaniu koncepcji poprawy wydajności generacji promieniowania THz w cienkich warstwach InAs. W rozdziale 4 omawiana jest technologia MBE wytwarzanych struktur. Rozdział 5 i 6 poświęcone są technikom eksperymentalnym i wynikom pomiarów; rozdział 7 przynosi podsumowanie pracy.

**Rozdział pierwszy** jest wstępem do pracy, w którym Autor uzasadnia wagę tematyki pracy i jej aktualność, formułuje hipotezę badawczą i omawia zakres badań.

**Rozdział drugi** stanowi obszerne wprowadzenie w metody generacji i detekcji impulsów terahercowych. Główny nacisk położony jest na analizę anten półprzewodnikowych działających na zasadzie przetworników fotoprzewodnościowych, które oświetlane silnym

impulsem laserowym emitują szerokopasmowe promieniowanie terahercowe. Podyktowane jest to stosowaną w późniejszych pomiarach emisji techniką spektroskopii w domenie czasowej (TDS). Oprócz generacji promieniowania terahercowego za pomocą anten fotoprzewodzących omawiane są również inne techniki powierzchniowej generacji promieniowania terahercowego, takie jak generacja przez impulsy prądowe wywołane polem elektrycznym w powierzchniowej warstwie zubożonej czy efektem Dembera (fotonapięciem powierzchniowym) oraz generacja w wyniku nieliniowych procesów drugiego rzędu (ang. *optical rectification*) i oscylacji ładunku w sprzężonych studniach kwantowych. Autor wspomina również o szeregu mniej rozpowszechnionych metod generacji promieniowania terahercowego znajdujących się na wczesnym etapie rozwoju opartych na wykorzystaniu nanowarstw węglowych czy kropek kwantowych z InAs. W odróżnieniu od metod generacji, metody detekcji zdominowane są przez dwie techniki; detekcję elektro-optyczną w kryształach nieliniowych i antenach fotoprzewodzących. Omawiany rozdział stanowi kompetentny przegląd stanu wiedzy i jest dobrym wprowadzeniem do oryginalnych rozważań Autora. Jego objętość mogłaby jednak być znacznie zmniejszona bez szkody dla całości pracy gdyby pominięto fragmenty, z których Autor w dalszych częściach pracy nie korzysta, takie jak np. rozważania teoretyczne na str. 24-31.

**Rozdział trzeci** przedstawia koncepcję wzmocnienia intensywności promieniowania terahercowego emitowanego przez cienkie warstwy InAs wzbudzone femtosekundowymi impulsami laserowymi. Punktem wyjścia do rozważań Autora jest praca S. Sasa et al., *J Infrared Milli Terahz Waves* (2011) 32:646–654, w której zaobserwowano zwiększoną w stosunku do materiałów objętościowych emisję promieniowania terahercowego z cienkich warstw InAs na podłożach GaSb i GaAs, tłumaczoną wkładem w całkowitą emisję promieniowania odbitego od granicy warstwa podłoże. W oparciu o te informacje proponowane jest rozwinięcie tej koncepcji poprzez wytworzenie w dolnej części warstwy InAs silnie domieszkowanego reflektora, zwiększającego na skutek efektu plazmonowego współczynnik odbicia i pozwalającego na dalszy wzrost natężenia promieniowania emitowanego na zewnątrz struktury. Elementarna analiza tego wzmocnienia i wyniki eksperymentalne potwierdzające występowanie efektu przytaczane są w omawianym rozdziale za pracą: M. Kozub et al., *J Infrared Milli Terahz Waves* (2015) 36:423–429, której autorzy pierwotnej pracy są współautorami. Nie ujmując zatem oryginalności pomysłu Doktoranta należy go rozpatrywać w odpowiednich proporcjach. Równocześnie trzeba podkreślić, że wiarygodne, eksperymentalne potwierdzenie efektu wzmocnienia wymagało sporego nakładu pracy i swoistego mistrzostwa w dziedzinie spektroskopii w dalekiej podczerwieni., czego dowodzą dalsze części rozprawy.

**Rozdział czwarty** poświęcony jest opisowi technologii MBE badanych struktur. Wytwarzano dwa typy struktur; pierwszy będący pochodną struktur tranzystora HEMT z gazem elektronowym o dużej gęstości i dużej ruchliwości w kanale n-InAs pełniącym rolę reflektora dla generowanego promieniowania terahercowego i drugi uproszczony z warstwą reflektora i warstwą aktywną wytwarzany dla celów referencyjnych. Obie struktury wytwarzano na półizolacyjnych podłożach GaAs o orientacji (100). Wytwarzano struktury domieszkowane jednorodnie i struktury o domieszkowaniu typu  $\delta$ . Szczegółowe warunki wzrostu wszystkich wyhodowanych struktur zebrane są w Uzupełnieniu B. Sądząc po opisie i wartościach parametrów procesu technologicznego zostały one wytworzone z zachowaniem „reguł sztuki”.

**Rozdział piąty** omawia techniki eksperymentalne stosowane w pracy. Problemy pomiarowe generalnie sprowadzają się do pomiaru koncentracji nośników w silnie domieszkowanej zagrzebanej warstwie reflektora i pomiaru przebiegów czasowych i rozkładów energetycznych emitowanego promieniowania. W pierwszym przypadku metodą z wyboru jest różniczkowa spektroskopia odbiciowa (FDR), w drugim terahercowa spektroskopia w domenie czasowej (TDS). Obie techniki pomiarowe charakteryzują się dużą złożonością i wymagają biegłości eksperymentalnej na najwyższym poziomie. W przypadku pomiarów różniczkowego odbicia Doktorant korzystał z istniejącego układu pomiarowego, dostępnego w Zespole Optycznej Spektroskopii Nanostruktur, natomiast układ do pomiarów spektroskopowych w domenie czasowej Doktorant zaprojektował i zbudował sam, wykorzystując femtosekundowy laser impulsowy ( $\lambda = 790$  nm), dostępny w laboratorium na Wydziale Chemii Politechniki Wrocławskiej. Promieniowanie emitowane przez antenę dipolową naniesioną na badaną próbkę InAs analizowane było przez detektor z LT-GaAs o konstrukcji anteny fotoprzewodzącej. Wysoki poziom prac eksperymentalnych jest niewątpliwym walorem dysertacji.

**Rozdział szósty** jest kluczowym rozdziałem pracy. Na kilkunastu stronach przynosi on zwięzłe omówienie wyników badań, które przekonująco potwierdzają hipotezę o możliwości zwiększenia natężenia promieniowania terahercowego emitowanego z cienkich warstw InAs przez zastosowanie silnie domieszkowanego, zagrzebanego reflektora. Najważniejsze rezultaty przeprowadzonych badań to udowodnienie ponad wszelką wątpliwość, że zastosowanie reflektora prowadzi do ponad dwukrotnej poprawy efektywności emisji promieniowania terahercowego n-InAs i 30% poprawy w przypadku p-InAs co oznacza, że są to w chwili obecnej najsilniejsze nieelektryczne źródła promieniowania terahercowego dostępne w laboratoriach. Ponadto stwierdzono nieznaczną (20%) poprawę natężenia w próbkach z domieszkowaniem typu  $\delta$  w porównaniu z próbkami domieszkowanymi jednorodnie. Są to ważne praktyczne rezultaty pracy.

**Rozdział siódmy** przynosi podsumowanie rezultatów pracy.

## WNIOSKI KOŃCOWE

Najważniejszym z naukowego i praktycznego punktu widzenia osiągnięciem pracy jest szczegółowa analiza mechanizmów generacji promieniowania terahercowego w warstwach InAs pobudzanych femtosekundowymi impulsami laserowymi dużej mocy i analiza sposobów zwiększenia wydajności emisji promieniowania na zewnątrz struktury. Na podkreślenie zasługuje również wkład pracy w rozwój wyspecjalizowanych technik spektroskopii terahercowej.

Recenzowana praca stanowi samodzielny i oryginalny dorobek naukowy autora. Dowodzi ona dużej biegłości autora w zakresie fizyki półprzewodników i technik eksperymentalnych spektroskopii w dalekiej podczerwieni. Doktorant dowiódł również, że potrafi zaprojektować i wykonać kompletny program badań: począwszy od prac technologicznych, poprzez charakteryzację wytworzonych struktur aż do pogłębionej interpretacji wyników. Jest to cenna umiejętność. Uważam pracę za wartościową, poszerzającą

naszą wiedzę na temat ciągle jeszcze mało zbadanego obszaru widma pola elektromagnetycznego a jej autora za dojrzałego do twórczej pracy naukowej.

Pewnym mankamentem pracy jest nie najlepsza organizacja materiału, brak podsumowań najważniejszych wyników na końcach rozdziałów i rozproszenie, czasami bardzo istotnych, wniosków i konkluzji w tekście. Nie zawsze uzasadniona jest objętość niektórych rozdziałów i zachwiane proporcje pomiędzy materiałem oryginalnym i przeglądem literatury, chociaż należy przyznać że te ostatnie fragmenty tekstu są napisane z dużym zrozumieniem i w sposób dojrzały. Zauważyłem również pojedyncze przypadki niestaranności w podawanych wzorach i niespójność układów jednostek. Dla przykładu wzór (3.6) na częstość plazmową jest podany w układzie cgs, podczas gdy wzór (5.13) na tą samą wielkość w układzie SI, przy czym oba mają błędną postać. Powyższe uwagi nie wpływają na moją ocenę wartości merytorycznej pracy. Pomijając wspomniane drobne mankamenty, Autor niewątpliwie osiągnął zadeklarowane cele pracy i udowodnił postawioną we wstępie hipotezę badawczą

**Podsumowując, wyrażam przekonanie, że praca mgr Michała Kozuba spełnia wymagania stawiane pracom na stopień naukowy doktora. Stawiam wniosek o dopuszczenie mgr Michała Kozuba do publicznej obrony pracy doktorskiej.**

