

Warszawa, 23-08-2021

Prof. dr hab. Tomasz Story
Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk
w Warszawie

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Dmitriya Yavorskiy'ego
pod tytułem
„Wzbudzenia dwuwymiarowej plazmy elektronowej w strukturach
półprzewodnikowych – detekcja oraz emisja promieniowania THz”**

Praca doktorska mgr. Dmitriya Yavorskiy'ego poświęcona jest doświadczalnym badaniom właściwości optycznych półprzewodnikowych heterostruktur warstwowych z dwuwymiarowym gazem elektronowym. Badania ukierunkowane są na zakres widmowy promieniowania terahercowego (także mikrofalowego) w celu zrozumienia roli wzbudzeń plazmy elektronowej w procesach emisji i detekcji promieniowania THz. Autor podejmuje ważne zadanie o dużej randze badawczej i aplikacyjnej, kluczowe dla opracowania sposobów kontrolowanej generacji i selektywnej detekcji promieniowania THz w półprzewodnikowych układach elektronicznych i optycznych. Bardzo szybki, ogólnosiwiatowy rozwój zastosowań promieniowania THz w medycynie i komunikacji, a także w przemyśle obronności i bezpieczeństwa nadaje tematyce podjętej przez doktoranta dużą rangę. Idea wykorzystania mikro-układów półprzewodnikowych w obszarze zarówno detekcji jak i generacji promieniowania THz jest kluczowa dla nowych, powszechnych zastosowań promieniowania THz. Zasadnicze znaczenie mają tu dobre półprzewodnikowe detektory i źródła, a także wiarygodne procedury pomiarowe, nowe materiały lub struktury półprzewodnikowe.

Osiągnięcie zamierzonych przez doktoranta celów wymagało: (1) zbudowania dedykowanych terahercowemu zakresowi spektralnemu, oryginalnych układów optycznych do badań półprzewodników, (2) opracowania metod elektronolitograficznego wytwarzania terahercowych heterostruktur plazmonicznych z powierzchnią siatką dielektryczną, (3) przeprowadzenia w funkcji pola magnetycznego i temperatury pomiarów spektralnych emiterów i detektorów promieniowania THz w postaci szeregu półprzewodnikowych heterostruktur, kryształów i komercyjnych przyrządów elektronicznych oraz (4) wykorzystania poczynionych obserwacji doświadczalnych do analizy mechanizmu wzbudzeń optycznych z udziałem plazmy elektronowej oraz krytycznej weryfikacji możliwości stosowania układów półprzewodnikowych jako selektywnych, sterowanych bramką elektrostatyczną, podświetleniem czy polem magnetycznym elementów spektroskopii THz.

Kluczowe dla recenzowanej rozprawy pomiary fotoprzewodnictwa i magnetotransmisji w zakresie spektralnym promieniowania terahercowego i mikrofalowego doktorant wykonał pod kierownictwem promotora prof. dr. hab. Jerzego Łusakowskiego oraz promotora pomocniczego dr. Krzysztofa Karpierza na zbudowanych, w zasadniczej części samodzielnie, układach pomiarowych na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. D. Yavorskiy udanie współpracował także z innymi zespołami, przede wszystkim z Wydziałem Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej (dr hab. Paweł Kopyto - pomiary mikrofalowe i terahercowe z wykorzystaniem analizatorów widma) oraz Instytutem Fizyki PAN (prof. dr hab. Jerzy Wróbel – mikrostrukturyzacja metodą elektronolitografii i prof. dr hab. Tomasz Wojtowicz - wytwarzanie metodą epitaksji z wiązek molekularnych (MBE) heterostruktur warstwowych CdTe/CdMgTe).

Rozprawa zawiera część wprowadzającą (rozdział 1) z uzasadnieniem podjęcia tej tematyki badawczej i podstawowymi informacjami o mechanizmach wzbudzeń elektronowych w półprzewodnikach w zakresie spektralnym THz, a także spisem publikacji autora związanych z tematyką rozprawy doktorskiej. Obszerny rozdział 2 zawiera szczegółowe omówienie zbudowanych i wykorzystywanych przez doktoranta optycznych układów doświadczalnych. Oryginalne wyniki badawcze autora dotyczące emisji i detekcji promieniowania THz zawarte są w rozdziałach 3 - 6, a krótkiego podsumowania rozprawy dokonano w rozdziale 7. Na końcu rozprawy autor zamieścił dodatek (rozdział 8) zawierający szczegółowy opis opracowanych procedur elektronolitograficznych. Ostatnim elementem rozprawy jest spis literatury przedmiotu (148 pozycji).

W rozdziale 1 przypomniane są podstawowe informacje na temat właściwości optycznych półprzewodników w zakresie spektralnym promieniowania terahercowego, ze szczególnym uwzględnieniem procesów kluczowych dla emisji i detekcji promieniowania THz i roli dwuwymiarowej plazmy elektronowej. Przedstawione są, w szczególności, wzbudzenia magnetoplazmonowe i podstawowy model teoretyczny Dyakonova - Shura. Zawarto tu także krótkie omówienie wniosków literaturowych z dotychczasowych pomiarów optycznych heterostruktur półprzewodnikowych w tym zakresie spektralnym. Jest to pożyteczne omówienie zagadnień ważnych dla zrozumienia całości rozprawy i umiejscowienia koncepcji tej pracy doktorskiej.

Rozdział 2 poświęcony jest szczegółowemu - czasem bardzo szczegółowemu (np. przygotowanie bolometru z opornika węglowego Allena-Bradleya - str. 42) - przedstawieniu trzech kluczowych układów doświadczalnych i procedur pomiarowych stosowanych przez doktoranta: kriogenicznego układu z detektorem InSb (strojonym polem magnetycznym), układu z analizatorami widma i układu z interferometrami (Michelsona albo Fabry'go - Perota). Mgr D. Yavorskiy miał kluczowy udział w zaprojektowaniu i zbudowaniu tych stanowisk pomiarowych. Lektura tego rozdziału daje przedsmak złożoności problemu wykonywania wiarygodnych pomiarów emisji lub detekcji w obszarze promieniowania THz w nowych układach półprzewodnikowych. Kluczowe znaczenie ma tu posiadanie dobrych źródeł i detektorów promieniowania (zarówno szerokopasmowych jak i spektralnie strojonych) a także odpowiednie przygotowanie próbek do pomiarów. Ten ostatni wymóg może, np. w przypadku sprzężeń plazmonowych, oznaczać konieczność mikrostrukturyzacji powierzchni półprzewodnika (naniesienie mikronowej siatki metalicznych pasków). Należy podkreślić, że bardzo rozległy zakres podjętych przez doktoranta prac doświadczalnych, jego dociekliwość, wnikliwość i krytyczność analizy wyników pomiarowych, a także rozległe kompetencje elektroniczne i optyczne zasługują na specjalne słowa uznania.

Choć w tym rozdziale przeprowadzona jest bardzo szczegółowa analiza warunków doświadczalnych stosowanych w różnych układach pomiarowych, autor nie podjął próby zbadania, w jednym eksperymencie, tego samego detektora lub emitera THz w kąpiel helowej powyżej i poniżej temperatury przejścia w stan nadciekły z ważną zmianą właściwości cieplnych helu (obserwowany efekt oscylacji temperatury?) i pewną zmianą stałej dielektrycznej ośrodka otaczającego układ THz?

W rozdziale 3 przedstawione są oryginalne wyniki pomiarów promieniowania generowanego przez komercyjne tranzystory polowe. Choć nie jest to nowy problem badawczy to pozostaje bardzo ważnym zagadnieniem aplikacyjnym, ciągle wymagającym opracowania dobrego modelu fizycznego i praktycznych sposobów wyboru i zasad stosowania takich przyrządów półprzewodnikowych jako elementów optycznych w zakresie

THz. Doktorant w pełni wykorzystał swoje układy pomiarowe do wykonania testów wielu tranzystorów polowych z pojedynczą bramką (głównie firmy Mitsubishi). Przekonywująco pokazał (pomiar z metaliczną przesłoną w falowodzie), że w badanych tranzystorach polowych generowane jest głównie promieniowanie mikrofalowe o częstotliwości 11,5 GHz z wieloma wyższymi harmonicznymi i charakterystycznym grzebieniem linii odległych o 100 MHz (związanych z mieszaniem sygnału UKF z sygnałem mikrofalowym). Choć wnioski z tych badań nie są optymistyczne to jednak w ważki sposób przyczyniają się do realistycznej oceny możliwości wykorzystania, odpowiednio zmodyfikowanych, komercyjnych tranzystorów polowych jako źródeł promieniowania THz.

W rozdziale 4 przedstawione są wyniki pomiarów emisji promieniowania THz z tranzystorów polowych GaAs/GaAlAs wytworzonych przez doktoranta w Instytucie Fizyki PAN metodą elektronolitografii z heterostruktur warstwowych o wysokiej ruchliwości nośników wyhodowanych w Instytucie Weizmanna w Izraelu. Kluczowym wynikiem tych badań jest obserwacja generacji promieniowania o częstotliwości 400 GHz, w dużej mierze niezależnej od testowanych różnych geometrii struktur czy wymiarów kanału przewodzącego. Doktorant przeprowadza tu także wyczerpującą dyskusję możliwych mechanizmów fizycznych (efekt Gunna, wzbudzenia plazmonowe, przejścia pomiędzy stanami pasmowymi lub domieszkowymi w studni GaAs) i proponuje nowy mechanizm związany z jonizacją zderzeniową donorów Si w barierze elektronowej (a nie w studni potencjału).

W rozdziale 5 autor zajmuje się problemem detekcji promieniowania THz przez wzbudzenie magnetoplazmonów w półprzewodnikowych heterostrukturach rodziny materiałów II-VI: pojedynczej lub podwójnej studni kwantowej CdTe z barierami elektronowymi CdMgTe. Na takich układach warstwowych (wytworzonych metodą MBE w Instytucie Fizyki PAN) doktorant samodzielnie wykonał (także w tym instytucie) metodą elektronolitografii dwa rodzaje siatek dyfrakcyjnych: metaliczne (złote paski działające jak polaryzator liniowy) i półprzewodnikowe (wytrawione rowki - polaryzacyjnie neutralne). Okres siatki (8 mikronów) wybrano w celu uzyskania dopasowania pędowego plazmonów i fotonów o energii w zakresie THz. Ten bardzo udany eksperyment technologiczny i optyczny przeprowadzony w funkcji pola magnetycznego pozwolił na zaobserwowanie rezonansowego sprzężenia promieniowania THz i wzbudzeń magnetoplazmonowych oraz doświadczalne określenie stanu polaryzacji związanej z wzbudzeniami magnetoplazmonów (liniowa) i przejściami cyklotronowymi (kołowa). Należy to uznać za duży sukces doktoranta. Jednocześnie, autor stwierdza, że nie udało mu się zaobserwować, przewidywanego teoretycznie, wzmocnienia transmisji promieniowania THz dla układów z siatką półprzewodnikową w porównaniu do metalicznej, co stanowiło część motywacji dla podjęcia tego projektu badawczego.

Rozdział 6 dotyczy szczegółowej doświadczalnej analizy właściwości stojącego pola magnetycznym detektora InSb pracującego w reżimie rezonansu cyklotronowego w obszarze spektralnym promieniowania THz. Autor odkrył, że ten ważny detektor półprzewodnikowy ma dotychczas nie uwzględnione cechy, które nie pozwalają na jego rezonansowe działanie detekcyjne dla częstotliwości poniżej 1 THz. To ważne ograniczenie związane jest z nierezonansową absorpcją na swobodnych nośnikach i bardzo silnym magnetooporem badanych kryształów InSb w temperaturach helowych w polach magnetycznych kilku tesli. Wykorzystując swoje dane doświadczalne magnetotransmisji uzyskane dla kilku częstotliwości promieniowania THz autor wyznacza także ważne parametry struktury pasmowej kryształów InSb (masę efektywną i g-czynnik elektronów), w dobrej zgodności z danymi literaturowymi.

Dyskutując w tym rozdziale różne możliwe przejścia elektronowe odpowiadające zakresowi THz autor koncentruje się na reżimie rezonansu cyklotronowego tj. przejściach pomiędzy kolejnymi poziomami Landaua. Jednak w półprzewodnikach wąskoprzerwowych, jakim niewątpliwie jest InSb, g-czynniki elektronów pasmowych są bardzo duże (str. 103) i rozszczepienia spinowe mogą być porównywalne z rozszczepieniami Landaua. Czy może to mieć znaczenia dla analizy przejść elektronowych o energiach kwantu promieniowania THz?

Rozdział 7 stanowi krótkie, ale trafne, podsumowanie głównych rezultatów pracy doktorskiej uzyskanych dla szeregu półprzewodnikowych układów z dwuwymiarową plazmą elektronową wraz ze wskazaniem przez autora kluczowych, w jego opinii, wyników doświadczalnych, rezultatów działań technologicznych i proponowanych interpretacji fizycznych.

Rozprawa zawiera także rozdział 8 - dodatek poświęcony bardzo szczegółowemu omówieniu opracowanych przez autora procedur technologicznych związanych z wytwarzaniem metodą elektronolitografii terahercowych mikrostruktur warstwowych z gazem dwuwymiarowym w studniach kwantowych w układach GaAs/GaAlAs i CdTe/CdMgTe. Niewątpliwie jest to źródło wyczerpującej i wartościowej wiedzy technologicznej bardzo cennej dla osób zamierzających podjąć podobne zadania.

Rozprawa została przygotowana bardzo starannie i jasno pod względem graficznym, edytorskim i językowym. Dostrzegłem tylko kilka drobnych potknięć:

na str. 15, we wzorze (1.6) drugi człon sumy po lewej stronie równania Eulera ma postać $\partial v / \partial x$ a nie, jak omyłkowo zapisano, $\partial x / \partial x$;

na str. 66, ruchliwość elektronów $2,7 \cdot 10^6$ powinna być podana w cm^2/Vs a nie, jak to uczyniono, w m^2/Vs .

Należy stwierdzić, że mgr Dmitriy Yavorskiy podjął i z sukcesem zrealizował bardzo wartościowy projekt badawczy stanowiący ważny wkład do zrozumienia mechanizmów emisji i detekcji promieniowania z zakresu spektralnego teraherców w różnorodnych warstwowych heterostrukturach półprzewodnikowych grup III-VI i II-VI z dwuwymiarowym gazem elektronowym.

Praca doktorska mgr. Dmitriya Yavorskiy'ego zawiera szereg ważnych osiągnięć badawczych, które można podsumować następująco:

- zaprojektowanie i zbudowanie szeregu stanowisk doświadczalnych oraz wykonanie pomiarów optycznych (fotoprzewodnictwo, magnetotransmisja) różnorodnych układów elektronicznych oraz heterostruktur półprzewodnikowych aktywnych w terahercowym zakresie widmowym;
- opracowanie szczegółowych technologicznych procedur elektronograficznej mikrostrukturyzacji warstwowych heterostruktur GaAs/GaAlAs i CdTe/CdMgTe pokrytych periodyczną siatką o mikronowym okresie, w postaci metalicznych pasków albo półprzewodnikowych rowków;
- zaobserwowanie w warstwowych heterostrukturach GaAs/GaAlAs generacji promieniowania w zakresie 400 GHz oraz dokonania wszechstronnej analizy możliwych fizycznych źródeł tego efektu i wskazanie na mechanizm związany z procesem jonizacji zderzeniowej domieszek donorowych w obszarze bariery elektronowej;

- wykorzystanie unikatowej możliwości optycznej obserwacji wzbudzeń elektronowych w zakresie THz w heterostrukturach CdTe/CdMgTe pokrytych siatką metaliczną albo siatką półprzewodnikową o okresie kilku mikronów do obserwacji liniowej polaryzacji promieniowania THz generowanego przez wzbudzenia plazmonów;
- wszechstronne i wnikliwe zbadanie kryształu InSb jako rezonansowego detektora promieniowania THz pracującego w reżimie rezonansu cyklotronowego i strojonego polem magnetycznym oraz odkrycie ważnych fizycznych ograniczeń dla stosowania tego detektora w zakresie spektralnym poniżej 1 THz.

Warto także podkreślić, że mgr Dmitriy Yavorskiy ma już bardzo dobry dorobek publikacyjny w postaci 19 prac oryginalnych opublikowanych w dobrych czasopismach międzynarodowych: *Journal of Applied Physics*, *Materials*, *Applied Sciences*, *Acta Physica Polonica A* czy też tegoroczna publikacja w *Physical Review B*. Tematyka 7 z tych prac jest związana z przedmiotem rozprawy doktorskiej. Doktorant jest pierwszym autorem 6 z tych prac.

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. Dmitriya Yavorskiy'ego pt. „Wzbudzenia dwuwymiarowej plazmy elektronowej w strukturach półprzewodnikowych – detekcja oraz emisja promieniowania THz” bardzo dobrze spełnia wymogi ustawowe stawiane pracom doktorskim z fizyki i wnoszę o dopuszczenie do jej publicznej obrony.

Touche Skon