



Prof. dr hab. **Igor Tralle**  
Wydział Matematyczno-Przyrodniczy  
Uniwersytetu Rzeszowskiego

Rzeszów, 30.11.2015

### Recenzja rozprawy doktorskiej

**Tytuł rozprawy:** Spektroskopia THz magnetoplazmonów w heterostrukturze GaAs/AlGaAs o wysokiej ruchliwości elektronów

**Autor:** mgr Marcin Bialek

Pan Mgr **Marcin Bialek** przedstawił do recenzji liczącą 153 strony rozprawę doktorską poświęconą związanym tematycznie badaniom generowania i detekcji promieniowania w zakresie THz na skutek wzbudzenia magnetoplazmonów w heterostrukturach GaAs/AlGaAs o dużej ruchliwości elektronów. Przedmiot danej rozprawy jest osadzony w ogólnym kontekście badań nad strukturami niskowymiarowymi oraz generowania i detekcji promieniowania w zakresie THz, co w dobie dzisiejszej jest tematem gorącym, wywołującym duże zainteresowanie w wielu ośrodkach badawczych zarówno w Polsce jak i za granicą. Rozprawa, napisana pod kierunkiem **dr hab., Prof. UW Jerzego Łusakowskiego**, oparta jest na **pięciu pracach** opublikowanych w renomowanych czasopismach naukowych, takich jak *Physical Review B*, *Journ. of Appl. Phys*, *Appl. Phys Lett.*, *Optical Engineering* oraz *Acta physica polonica A*.

Recenzowana rozprawa składa się ze *Streszczenia*, czterech zasadniczych rozdziałów, stanowiących jej treść merytoryczną oraz *Podsumowania*. Dysertacja zawiera 153 stron tekstu, zaś bibliografia obejmuje 153 pozycji.

Rozprawa zaczyna się od *Streszczenia*, w którym to streszczeniu zostały określone: merytoryczny zakres pracy, dotychczasowy stan wiedzy w zakresie tematyki pracy, jej cel, którym jest badanie wzbudzeń plazmy w dwuwymiarowym gazie elektronów (2DEG) heterostruktur GaAs/AlGaAs w zależności od takich parametrów, jak pole magnetyczne, częstość promieniowania THz oraz napięcie polaryzujące bramkę.

Rozdział **pierwszy** recenzowanej rozprawy zawiera krótkie, zwięzłe, czasami – co jest bardzo istotne – krytyczne wobec prac poprzedników i niezbędne wprowadzenie w obszar zagadnień, stanowiących główny nurt badań Autora.

Krótki rozdział **drugi** rozprawy w całości jest poświęcony zwięzłemu i szczegółowemu opisowi technologii przygotowania próbek, co stanowi ważną część przygotowania się do przeprowadzenia eksperymentów.

W rozdziale zostały opisane zarówno koncepcja wykorzystywanych próbek jak i procesy technologiczne, towarzyszące ich wytwarzaniu, takie jak wytwarzanie kontaktów omowych, wytwarzanie mes oraz napylenie metalizacji. Treść rozdziału pokazuje, iż doktorant dokładnie przeanalizował właściwości zaprojektowanych przez siebie próbek, co następnie pozwoliło w sposób świadomy zaplanować główne eksperymenty.

W rozdziale **trzecim** Autor przechodzi do omówienia konstrukcji układu eksperymentalnego, który powinien być zaprojektowany w taki sposób, aby na jego podstawie móc zbadać wzbudzenia plazmonów, co wiąże się z możliwością przeprowadzenia pomiarów prądowo-napięciowych oraz kontroli rozmaitych czynników, wpływających na rezultaty pomiarów.

Obserwacja rezonansowej detekcji promieniowania w zakresie THz przez tranzystory polowe wymaga bardzo niskich temperatur (temperatur ciekłego helu), toteż część tego rozdziału poświęcona jest szczegółowemu opisowi układu kriogenicznego. Autor bardzo słusznie zauważa, że procedury schładzania próbki mogą w sposób istotny wpływać na wyniki pomiarów, a zatem należy w sposób dokładny i precyzyjny opisać metody chłodzenia zastosowane w eksperymentach. Pod tym względem szczególnie interesującą metodą, wykorzystaną w pracy jest zastosowanie kontrkriostatu, co pozwala na ustalenie temperatury badanej próbki w zakresie od 1.8 K do temperatury rzędu pokojowej. Na podkreślenie zasługuje fakt, iż zastosowanie tej metody pozwala również na obniżenie ciśnienia do ok. 50 mbar, a to z kolei prowadzi do tego, że w temperaturze ok. 2.17 ciekły hel przechodzi przemianę fazową i staje się nadciekły. Oznacza to, że jeżeli próbka znajdowała się w cieczy, zanikały jej drgania związane z wrzieniem ciekłego helu, co w konsekwencji zwiększało dokładność pomiarów. Ponadto, w pierwszym podrozdziale rozdziału pierwszego Autor oszacował wydajność chłodzenia, biorąc pod uwagę energię promieniowania THz absorbowaną przez próbkę w warunkach kriogenicznych i wykazał, że jest ona wystarczająco wysoka po to, aby można było stwierdzić, że nie wpływa to na dokładność pomiarów temperatury. W kolejnych paragrafach tego rozdziału szczegółowo zostały opisane: układ służący do badania detekcji promieniowania, wykorzystywane źródła promieniowania THz i ich porównanie tak pod względem mocy i częstości promieniowania jak i możliwości jego modulacji, układy optyczne zastosowane do wprowadzenia promieniowania THz do kriostatu oraz techniki pomiarów elektrycznych.

Ogromnie ważna dla przeprowadzenia eksperymentów była optyka THz, toteż Autor dużo uwagi poświęcił jej opisowi, zwłaszcza sprzęgnięciu źródła promieniowania z kriostatem helowym zawierającym cewkę, wytwarzającą silne pole magnetyczne. W tym miejscu na podkreślenie zasługuje niezwykle i sprawiający duże wrażenie kunszt doświadczalnika, którym wykazał się Autor recenzowanej rozprawy w tworzeniu stanowiska pomiarowego i zadbanie o każdy szczegół.

Jako przykład, być może i mniej istotny ale jaskrawy, można podać opis przeprowadzenia pomiarów elektrycznych w podrozdziale 3.2.3, w którym Pan Marcin Białek starannie opisuje połączenia i kable, za pomocą których uchwyt z próbką został połączony z urządzeniami na zewnątrz kriostatu. Taka staranność i dbanie o szczegóły stanowi o wiarygodności uzyskanych rezultatów eksperymentalnych.

Ostatni, **czwarty rozdział**, zatytułowany „Wyniki i interpretacja pomiarów” jest najważniejszym, wieńczącym rozprawę. Skupia się w nim Autor na przedstawieniu i skrupulatnej analizie uzyskanych wyników. Podobnie jak rozdział poprzedni, charakteryzuje się precyzją i dbaniem o szczegóły. Rozdział zaczyna się od analizy charakterystyk prądowo-napięciowych badanych próbek oraz zależności koncentracji nośników ładunku (elektronów) od napięcia na bramce. Rezultatem pomiarów jest zależność oporu próbki od pola magnetycznego. Aby można było wyznaczyć koncentrację elektronów, należało wyznaczyć zależność oporu od odwrotności indukcji pola magnetycznego. W dalszym ciągu, aby móc skorzystać z transformacji Fouriera, należało w jakiś sposób wyeliminować zaburzenie oscylacji Shubnikowa - de Haasa spowodowane obecnością tła- monotonicznie zmieniającego się magnetooporu. W tym celu dokonano interpolacji odpowiednich zależności  $R(1/B)$  za pomocą spline’ów. Rezultaty takiej procedury odejmowania tła przedstawiono w postaci odpowiednich wykresów. Najważniejszym rezultatem pierwszego podrozdziału jest charakteryzacja próbek użytych w dalszych badaniach, w tym wyznaczenie ruchliwości elektronów oraz czasu rozproszenia kwantowego i czasu relaksacji pędu. Sporo uwagi Autor poświęca również wyborowi temperatury, przy której należało przeprowadzić pomiary po to, aby wypośredkować efekt wzrostu amplitudy sygnału wraz ze spadkiem temperatury z jednej strony, a nadmierną amplitudą optycznie indukowanych oscylacji SdH z drugiej. Za najlepszą uznano temperaturę 4.2 K. W tym miejscu warto także podkreślić, jak bogaty materiał doświadczalny został tu zgromadzony.

W dalszej części tego rozdziału Autor przechodzi do analizy charakterystyk poszczególnych modów plazmonów zaobserwowanych w eksperymentach z użyciem różnych źródeł promieniowania THz, takich jak VDI, karcinotron (BWO) oraz laser THz. Przeprowadzona analiza pozwoliła na obliczenie częstości poszczególnych modów, jak również pokazała dużą zgodność ilościową pomiędzy rezultatami pomiarów a przewidywaniami teoretycznymi, dotyczącymi częstości plazmonów. Wyraźnie to pokazują rysunki 4.14 oraz 4.15 z rozdziału czwartego. W tych przypadkach, kiedy uzyskane wyniki odbiegają od tego, czego można byłoby się spodziewać, Autor wysuwa pewne hipotezy i podaje uzasadnione wyjaśnienia zaobserwowanych rozbieżności. Można w tym miejscu dodać komentarz natury filozoficznej, że to rezultaty obserwacji odzwierciedlają naturę i to raczej teoretycy powinni martwić się niezgodnością rezultatów ich obliczeń z danymi eksperymentów, jednakże tu na podkreślenie zasługuje fakt rzetelności naukowej Autora rozprawy. Na podstawie wyznaczonych częstości, w dalszej części rozprawy Pan Marcin przechodzi do ustalenia dyspersji plazmonów, które to plazmony mogą być ekranowane, nieekranowane lub mieszane. Rezultaty wyznaczania krzywych dyspersji plazmonów w próbkach bez bramki znakomicie pokrywają się

z rezultatami teoretycznymi (Rys. 4.16). W przypadku próbek przykrytych bramkami obserwuje się co drugi mod spośród tych widocznych w próbkach bez bramki i Autor rozprawy słusznie zadaje pytanie: z czego to wynika? W próbie odpowiedzi najpierw rzetelnie stwierdza, że nie jest to absolutnie jasne, a potem wysuwa parę hipotez, które mogłyby wyjaśnić sprawę. Należy się spodziewać, że w przyszłych badaniach Panu magistrzowi uda się rozwikłać tę zagadkę.

Jednym z najbardziej spektakularnych i interesujących rezultatów recenzowanej pracy doktorskiej jest zaobserwowanie w eksperymencie drugiej harmonicznej rezonansu cyklotronowego. Z fizycznego punktu widzenia jest to przejście o dwa poziomy wyżej w drabinie poziomów kwantyzacji Landaua, które to przejście powinno być zabronione ze względu na symetrię funkcji falowych odpowiadających poziomom uwikłanym w takie przejście. Autor rozprawy podejmuje się szczegółowej analizy modeli teoretycznych, przedstawionych w najnowszych publikacjach (ostatnia pochodzi z roku 2014) dotyczących danego zagadnienia i pokazuje, że żaden z tych modeli, uwzględniających możliwe oddziaływanie magnetoplazmonu z modelem Bernsteina nie jest w stanie opisać obserwowanego efektu w stopniu zadowalającym. Następnie dochodzi do wniosku, że ten efekt powinien mieć związek z siłą ponderomotoryczną powstającą na krawędziach bramek, oświetlonych promieniowaniem THz i wskazuję, że obecnie brak jest teorii, która mogłaby należycie wyjaśnić zaobserwowane zjawisko.

Niezwykle ważne i interesujące są również rezultaty przedstawione w kolejnym podrozdziale 4.2.6 dotyczące rezonansów magnetoplazmowych, strojonych napięciem przyłożonym do bramki struktury i polem magnetycznym. Wyniki te są bardzo obiecujące z punktu widzenia możliwości ich zastosowania do budowy przestrzajnego detektora promieniowania THz.

Kolejne podrozdziały pracy doktorskiej są poświęcone opisowi eksperymentów dotyczących wzbudzenia magnetoplazmonów z użyciem lasera THz. W tym przypadku, inaczej niż w przypadku źródeł z możliwością ciągłej przestrzajności częstości, wykorzystane zostały pojedyncze częstości. Zostały zidentyfikowane odpowiednie magnetoplazmony oraz charakter ich dyspersji.

Podsumowując tę część recenzji, chciałbym dodać kilka zdań natury ogólnej. Recenzowana praca doktorska dotyczy bardzo aktualnej i ważnej tematyki, związanej z badaniem układów niskowymiarowych, w szczególności ważnej tak z punktu widzenia niezwykle ciekawej fizyki jak i potencjalnego zastosowania, jakim jest detekcja i generowanie promieniowania w zakresie THz. Charakteryzując warsztat i kunszt eksperymentatorski Autora rozprawy, pragnę podkreślić, że są one na bardzo wysokim poziomie. Należą do nich, między innymi, opanowanie technik pomiarowych w temperaturach ciekłego helu, technik laserowych i falowodowych w zakresie THz, silnych pól magnetycznych oraz spektroskopii fourierowskiej.

Zadaniem recenzenta niejako z urzędu jest wyszukiwanie mankamentów w recenzowanej rozprawie, a ponieważ „*nobody and nothing is perfect*”, również i w danej pracy można dostrzec niektóre drobne usterki. Oto kilka przykładów.

W rozdziale pierwszym, na stronie 2 czytamy: „Najogólniej, transport w gazie elektronów określony jest przez równanie Boltzmanna opisującego dynamikę funkcji rozkładu gęstości elektronów”. Z tym stwierdzeniem można byłoby się zgodzić, gdyby Autor dodał, że ma na myśli klasyczny gaz elektronów. W przypadkach, kiedy chcemy uwzględnić efekty kwantowe, podejście oparte na równaniu Boltzmanna nie jest podejściem najogólniejszym, wówczas w grę wchodzi inne równania i inne techniki matematyczne.

Na stronie 4 tegoż rozdziału pojawia się zdanie: „...w niniejszej pracy w miejscach gdzie pojawia się  $\omega_c$ , najczęściej chodzi o natężenie pola magnetycznego”. Jednak wzór na  $\omega_c$  zawiera *indukcję pola magnetycznego*. Wszędzie w tekście rozprawy pole magnetyczne jest wyrażane i mierzone, jak w układzie SI w  $T$ , czyli chodzi o indukcję pola magnetycznego, a nie jego natężenie. Warto nadmienić, że w układzie SI  $\mathbf{B}$  i  $\mathbf{H}$  (indukcja pola i jego natężenie) mają różny wymiar –  $MT^{-2}I^{-1}$  dla  $\mathbf{B}$  i  $L^{-1}I$  dla  $\mathbf{H}$ .

Na stronie 5: „...pole magnetyczne wytwarza... potencjał harmoniczny”. Wydaje się, że określenie „potencjał paraboliczny” byłoby lepsze. W literaturze spotykamy określenie ‘oscylator harmoniczny’, podczas gdy w stosunku do potencjału praktycznie zawsze używa się określenia ‘potencjał paraboliczny’.

Na stronie 41 jak i na stronie 107, Autor używa określenia „wyniki transportowe” i „opis wyników transportowych”. Jasne jest, że to skrót myślowy i należałoby raczej napisać: „opis wyników pomiarów własności transportowych”, albo „transportu nośników ładunku”.

Na stronie 63 pojawia się zdanie: „Tak przemnożone krzywe są całkowane...” . Moim zdaniem, to też jest skrót myślowy i należałoby napisać coś w rodzaju: „funkcję reprezentowane przez przedstawione krzywe są całkowane...”

Na stronie 69 jest opisana procedura przeprowadzenia transformacji Fouriera zmierzonych sygnałów. Autor rozprawy stwierdza, iż ponieważ każdy z poszczególnych sygnałów był bardzo słaby, transformacji Fouriera poddawana była ich suma. Moim zdaniem, taka procedura wymaga wyjaśnienia i uzasadnienia, bowiem ten punkt jest bardzo delikatny, gdyż można podać przykład sumy dwóch funkcji okresowych, która sama nie jest funkcją okresową, albo taki, gdzie suma dwóch funkcji o takim samym okresie jest funkcją o okresie dwa razy mniejszym.

## **Konkluzja**

Reasumując, pragnę stanowczo stwierdzić, iż wymienione powyżej z obowiązku recenzenta drobne mankamenty rozprawy Pana mgra Marcina Białka w żaden sposób nie wpływają na moją bardzo wysoką ocenę tej pracy. Rozprawa napisana jest w swojej zasadniczej części jasno i zrozumiale, poprawną polszczyzną.

Szczegółowe zapoznanie się z treścią rozprawy oraz intensywna wymiana listów, w rezultacie której uzyskałem odpowiedzi na wszystkie moje pytania, jak

również dorobek naukowy Pana mgra utwierdziły mnie w przekonaniu o jego wysokich kwalifikacjach. Recenzowana rozprawa doktorska, napisana pod opieką naukową promotora - dr. hab. Jerzego Łusakowskiego, prof. UW – jest oryginalnym rozwiązaniem kilku zagadnień naukowych, stanowiących **istotny wkład** do obszaru wiedzy, który można określić jako **eksperymentalne badania nad wzbudzeniami plazmonów i magnetoplazmonów w dwuwymiarowym gazie elektronów**. Pokazuje ona także jego ogólną wiedzę w dziedzinie fizyki ciała stałego i półprzewodników, fizyki struktur niskowymiarowych oraz nowoczesnych i bardzo zaawansowanych technik eksperymentalnych. Rozprawa charakteryzuje się indywidualnym wkładem Autora do rozwiązania omówionych wyżej zagadnień, a zatem spełnia wszystkie wymagania Ustawy o Stopniach i Tytułach Naukowych. Niniejszym wnoszę zatem o dopuszczenie Pana **mgr Marcina Białka do dalszych kroków przewodu doktorskiego**.

Ze względu na walory merytoryczne pracy doktorskiej Pana **Marcina Białka**, wnoszę również o jej **wyróżnienie**. Umotywowanie wniosku o wyróżnienie pracy jest następujące:

1. W recenzowanej pracy doktorskiej została zaobserwowana druga harmoniczna rezonansu cyklotronowego. Z fizycznego punktu widzenia jest to przejście o dwa poziomy wyżej w drabinie poziomów kwantyzacji Landaua, które to przejście powinno być zabronione ze względu na symetrię funkcji falowych odpowiadających poziomom uwikłanym w takie przejście. Uzyskane rezultaty eksperymentalne dobitnie pokazują, iż istniejące modele teoretyczne muszą być istotnie uzupełnione i udoskonalone, aby móc należycie wyjaśnić zaobserwowane zjawisko.
2. W pracy zostały zaobserwowane rezonansy magnetoplazmowe, strojone napięciem przyłożonym do bramki struktury i polem magnetycznym. Wyniki te są bardzo obiecujące z punktu widzenia możliwości ich zastosowania do budowy przestrajalnego detektora promieniowania THz.
3. Rozprawa oparta jest na pięciu artykułach opublikowanych w czasopismach z 'listy filadelfijskiej' o wysokiej punktacji ministerialnej oraz dużym impakt-faktorze.

