

**Recenzja rozprawy doktorskiej magistra Ignasa Grigelionisa p.t.
"Terahertz magnetospectroscopy of high electron mobility CdTe/CdMgTe
quantum wells"**

Rozprawa składa się z części teoretycznej, z opisu próbek i układu eksperymentalnego oraz z opisu wyników pomiarów wraz z ich interpretacją. Badania związane z rozprawą zaowocowały sześcioma publikacjami w recenzowanych pismach międzynarodowych oraz siedmioma prezentacjami na międzynarodowych konferencjach. Świadczy to o wysokiej jakości naukowej prowadzonych badań, mam jednak szereg zastrzeżeń do prezentacji tych wyników w pracy.

We wstępie brakuje mi wyraźniejszego nakreślenia motywacji dla wykonanych badań, uzasadnienia wyboru próbek oraz metod pomiarowych.

Część teoretyczna zawiera wzory potrzebne później do interpretacji danych doświadczalnych. Autor przedstawił wyniki wielu prac opisujących własności transportowe i optyczne gazu dwuwymiarowego w polu magnetycznym, modele oddziaływania elektron-fonon, teorię magnetoplasmonów, oddziaływanie światła podczerwonego z gazem elektronowym. W tej części niektóre opisy modeli wydają mi się zbyt szczegółowe jak na pracę eksperymentalną, zawierają też trochę błędów. Wystarczy, że autor zna założenia modeli teoretycznych, ich zakresy stosowalności i końcowe wzory, potrzebne do interpretacji wyników eksperymentu.

Nie mam zastrzeżeń do opisu próbek i układu eksperymentalnego. Próbką P5 zawierała studnię z CdMnTe; czy autor spodziewał się innych własności tej studni w polu magnetycznym?

Najważniejsza część pracy to opis wyników i ich interpretacja (rozdział III). Najpierw omówione są wyniki pomiarów transportowych. Z okresu oscylacji Shubnikova-de Haasa wyznaczono koncentrację w próbkach P1 i P2 a z amplitud tych oscylacji wyznaczono kwantowe czasy rozpraszania dla tych próbek (rzędu 0.5 ps) i poszerzenia poziomów Landaua rzędu 0.6 meV. Z temperaturowej zależności tych amplitud wyznaczono masy efektywne elektronów. Oszacowano rozszczepienia spinowe i otrzymano g-czynnik około 3.8 (znacznie większy niż w CdTe) co wiązano z wpływem oddziaływań wielociałowych. W próbkach z metalową bramką (P3 i P4?) autor spodziewał się zmian koncentracji nośników przy zmianie potencjału bramki. Tymczasem okres koncentracji Shubnikova-de Haasa na rys. I.4 nie zmieniał się z przyłożeniem napięcia do bramki. Wyjaśniono to tym, że jedynie około 1/4 powierzchni kanału przewodzącego było pokryte metalizacją. Wykonano więc pomiary modulacyjne w których wyznaczono zmianę (pochodną) prądu w kanale dwuwymiarowym przy zmianie potencjału bramki. Te pomiary pokazały znaczącą zmianę koncentracji ze zmianą potencjału bramki (rys.I.5). Chciałoby się jednak zrozumieć, dlaczego na rys.I.4 nie widać żadnego efektu; być może zmiany oporu wywołane modulacją potencjału bramki były za małe żeby się uwidocznili w pomiarze stałoprądowym? Wymaga to wyjaśnienia.

W pomiarze magnetooporu próbki P5 (zawierającej studnię CdMnTe) i próbki P2 oprócz oscylacji Shubnikova-de Haasa zaobserwowano (w temperaturze 1.8K) minimum

magnetooporu odpowiadające wypełnieniu $3/2$ poziomów Landaua. Pomiary w jeszcze niższych temperaturach mogłyby ujawnić ułamkowy efekt Halla w tych próbkach dla innych ułamków.

W drugiej części rozdziału III omówione są efekty polaronowe, widziane w pomiarach magnetotransmisji w próbkach GR i G1. Linie rezonansu cyklotronowego (obserwowane w spektrometrze furierowskim) przesuwają się z polem magnetycznym liniowo w słabszych polach a powyżej 10T podliniowo, co wiązano z "odpychaniem" przez poziom fononu LO. Z części liniowej wyznaczono masę cyklotronową. Natomiast oddziaływanie z fononem LO opisano poprzez "przekalibrowanie" wyników z pracy Nicholasa et al dotyczącej InSe. Masa cyklotronowa silnie rośnie z polem magnetycznym w wyniku "odpychania" przez poziom fononu LO (rys.II.4). W dyskusjach dotyczących masy efektywnej elektronów zabrakło mi oszacowania efektów nieparabolicznych w studniach CdTe.

W trzeciej części rozdziału III przedstawione są wyniki pomiarów fotoprądu w dalekiej podczerwieni przy użyciu kilku linii lasera molekularnego. W próbkach P3 i P4 obserwowano rezonans cyklotronowy dla różnych wartości pola magnetycznego i na różnych liniach laserowych. Oświetlenie próbki, w przeciwieństwie do fotoprądu dla przejść międzypasmowych, może tu skutkować zarówno wzrostem jak i spadkiem oporu. W każdym razie z położenia ostrych linii rezonansu cyklotronowego wyznaczono masy efektywne elektronów w tych próbkach. Analizowano również natężenia tych linii które zależało nie tylko od mocy światła pobudzającego ale również od położenia poziomu Fermiego w stosunku do poziomów Landaua; najsilniejsze wzrosty fotoprądu obserwowano w sytuacji odpowiadającej minimom oporu próbki.

W próbkach P1 i P2 oprócz linii rezonansu cyklotronowego (dla tych próbek odpowiadających minimom fotoprądu) zaobserwowano fotoprądowy analog oscylacji Shubnikova-de Haasa. Oscylacje te, występujące w stosunkowo niskich polach ($<6T$) są bardzo wyraźne i nie zależą od energii światła pobudzającego. Autor (na podstawie pracy Neppl et al) wyjaśnia ten efekt nagrzewaniem gazu elektronowego przez światło i oscylacjami ciepła właściwego elektronów gdy poziom Fermiego przechodzi przez poziomy Landaua. Podobnie jak w części teoretycznej pracy autor niepotrzebnie brnie w szczegóły modelu przytaczając błędne wzory jak (III.4). W dalszej części rozdziału analizowane są podwójne linie w widmach fotoprądu, widoczne szczególnie wyraźnie przy dwóch wypełnionych poziomach Landaua. W oscylacjach magnetooporu takie podwójne linie nie występują. Autor wyjaśnia ten efekt wzrostem temperatury gazu elektronowego powodującym "niszczenie" stanu kwantowego Halla dla pól magnetycznych bliskich warunkowi całkowitego wypełnienia poziomów Landaua.

W zakończeniu tego rozdziału autor uzasadnia dlaczego oscylacje fotoprądu nie były obserwowane w próbkach P3 i P4. Przypisuje to nagrzewaniu tych próbek przez prąd co powoduje zanik oscylacji w fotoprądzie. Pomiary modulacyjne fotoprądu na tych próbkach były bowiem prowadzone przy wyższych napięciach stałych. Nasuwa się oczywiste pytanie, dlaczego nie przeprowadzono pomiarów przy niższych napięciach...

Czwarta część rozdziału opisującego wyniki eksperymentalne poświęcona jest oscylacjom magnetoplazmy w próbkach z metaliczną siatką (G1 i G2) oraz z wąskim kanałem przewodzącym (QPC - Quantum Point Contact). W tego typu próbkach światło zostaje ugięte jak w siatce dyfrakcyjnej i może być absorbowane przez dwuwymiarowe magnetoplazmony o wektorze falowym $k_j = 2\pi j/L$ gdzie L to okres siatki. W widmach transmisji próbek G1 i G2 na rys. IV.1 (otrzymanych dla stałej energii lasera w funkcji pola magnetycznego) widać zarówno silną linię rezonansu cyklotronowego oraz szereg słabszych linii odpowiadających magnetoplazmonom. Autor zapomniał tutaj dodać wyniki dla próbki GR o której pisze w tekście pracy. W dalszej części autor analizuje zależność częstości magnetoplazmonów od pola magnetycznego i pokazuje, że dla parametrów badanych studni CdTe i energii lasera użytych w pracy możemy używać przybliżenia lokalnego które prowadzi do prostego wzoru IV.6. Dodatkowo, dla próbek pokrytych metaliczną siatką autor proponuje uśrednienie funkcji dielektrycznej pomiędzy wartościami z metalizacją i bez metalizacji. Ostatecznie przy użyciu tych wzorów autor tworzy rysunek IV.4 na podstawie rysunku IV.1. Rysunek IV.4, jak rozumiem, pokazuje częstości plazmonów dla pola $B=0$ ekstrapolowane z rysunku IV.1 przy użyciu wzoru IV.6 i IV.7 ale z tekstu pracy nie jest to dla mnie jasne.

Dla próbki z wąskim kanałem przewodzącym (QPC) zmierzono widma fotoprądu w funkcji pola magnetycznego dla energii lasera 2.52 THz. Podobnie jak dla widm transmisji dla próbek G1 i G2 zaobserwowano linię rezonansu cyklotronowego oraz szereg linii przypisywanych magnetoplazmonom. Położenie tych linii nie zmieniało się z napięciem przyłożonym do poprzecznej bramki. Autor interpretuje te wyniki analogicznie do tych otrzymanych na próbkach G1 i G2 z metaliczną siatką, zastępując okres siatki szerokością kanału przewodzącego. Chciałoby się jednak lepiej zrozumieć dlaczego światło sprzęga się z plazmonami w takim kanale - czytelnik jest odesłany do pracy Eliasson et al. Brak wpływu napięcia bramki na obserwowane częstości wynika stąd, że zmiany szerokości kanału z napięciem prowadzą do przesunięć mniejszych niż szerokości połówkowe linii. Na rysunku IV.8 pokazane są widma fotoprądu dla dwóch energii lasera. Krzywa dla linii lasera 118.8 mikrona powinna pokrywać się z krzywą dla $V=0$ na rysunku IV.6 a tymczasem wygląda inaczej.

Ostatnia część rozdziału III poświęcona jest pomiarom fotoprądu w strukturach typu tranzystora HEMT w których napięcie na bramce zmienia koncentrację w kanale dwuwymiarowym. Badane były próbki P5 i HB w temperaturze 1.8K w silnych polach, przy oświetleniu przez laser molekularny. Wartości pola magnetycznego były tak dobrane aby energia rezonansu cyklotronowego odpowiadała energii lasera. Mierzono sygnał fotoprądu w funkcji napięcia bramki za pomocą którego zmieniano koncentrację, a co za tym idzie, obsadzenie poziomów Landaua. Fotoprąd dla próbki HB wykazuje schodkowy wzrost dla napięć bramki odpowiadających zapełnieniu pierwszego i drugiego poziomu Landaua. Natomiast dla próbki P5 fotoprąd rośnie przy obsadzaniu pierwszego poziomu Landaua a potem spada. Na koniec autor stwierdził, że pomiary fotoprądu w zerowym polu magnetycznym (i w niskiej temperaturze) nie pokazały sygnału fotoprądu przewidywanego przez teorię niestabilności plazmowych Dyakonova.

W zakończeniu pracy autor nakreśla dalsze eksperymenty które można przeprowadzić na badanych próbkach; głównym ograniczeniem badań przeprowadzonych w pracy był brak omowych kontaktów dla pomiaru efektu Halla w niskich polach i kwantowego Halla w wysokich polach.

Reasumując, praca zawiera bardzo bogaty materiał eksperymentalny oraz rozważania teoretyczne, natomiast prezentacja zawiera wiele mankamentów i dla czytelnika spoza "branży magnety spektroskopii terahercowej" (takiego jak ja) nie jest łatwa do zrozumienia. Znalazłem też wiele błędów i omyłek we wzorach. Nie zmienia to jednak faktu, że praca spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim i z pełnym przekonaniem wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Ocena dorobku naukowego magistra Ignasa Grigelionisa

Na Web of Knowledge znalazłem 10 prac pana Grigelionisa z zakresu badań w dalekiej podczerwieni oraz kilkaset prac z dziedziny cząstek elementarnych. Pomijając te ostatnie (posiadające kilkuset lub więcej współautorów i ukazujące się 3 razy w miesiącu) należy jednak uznać dorobek pana Grigelionisa za wyjątkowo bogaty. Prace są głównie z ostatnich lat więc trudno oczekiwać wielu cytowań, natomiast praca z Journal of Applied Physics z 2011 roku ma 14 cytowań.

Witold Tmejalski