

Jacek Kossut
Instytutu Fizyki Polskiej Akademii Nauk
w Warszawie

Odzienkał Wydziału Fizyki UW
Sekcja ds. pracowniczych
Wpłynęło do 3.08.2015
podpisa/

Recenzja pracy doktorskiej mgr Ignasa Grigolionisa „Terahertz magnetospectroscopy of high elektron mobility CdTe/CdMgTe quantum wells”

Przedstawiona mi do recenzji praca doktorska jest obszerna i składa się z trzech części. Pierwsza z nich to wprowadzenie teoretyczne do zjawisk, którymi zajmował się autor (12 stron), świadcząca o dobrej orientacji autora w tematyce rozprawy. W drugiej części zaprezentowane są próbki heterostruktur półprzewodnikowych, na których wykonywane były pomiary jak również opisane zostały układy pomiarowe wykorzystywane w badaniach (7 stron) oraz część trzecia, najobszerniejsza, licząca stron 54, w której przedstawione są wyniki i ich analiza i interpretacja. Prace kończą zwięzłe konkluzje oraz szczegółowy spis literatury. Wyniki pracy zostały opublikowane w wymienionych na stronie 8 sześciu artykułach w czasopismach i materiałach pokonferencyjnych. W większości zawartych w tym spisie publikacjach mgr Grigolionis jest pierwszym autorem (wszystkie te publikacje są wieloautorskie) z jednym wyjątkiem (pozycja 4 spisu). Ale też mam wrażenie, że publikacja ta znalazła się tu przez pomyłkę, jako, że dotyczy ona nie heterostruktur z półprzewodników II-VI, które ma za temat obecna praca doktorska, a tranzystorów krzemowych. Podobnie jest zresztą w przypadku pozycji 6 wymienionego spisu. Ta publikacja z kolei dotyczy tranzystora Ge/Si. Pracę doktorską uzupełniają krótki wstęp formułujący cele, jakie postawił sobie doktorant, spisy rysunków, tabel i użytych w tekście symboli matematycznych. Taki układ jest w zasadzie jasny i logiczny i powinien sprawiać, że lektura jest nietrudna. Pewną konfuzję może czynić zastosowana numeracja rozdziałów i podrozdziałów. W jej wyniku mamy, na przykład, dwa rysunki oznaczone numerem III.1 (strona 16 i 52), dwa rysunki oznaczone numerem III.2 (strona 17 i 56), itd. To z kolei nie ułatwia czytania pracy. Praca napisana jest w języku niezbyt dobrym angielskim. Nie mniej formalne jego zrozumienie jest możliwe. Szkoda, że na etapie edycji nie zadbano o porządną korektę językową.

Jak wspomniałem, w części II rozprawy opisane są próbki będące przedmiotem pomiarów. Próbek tych było w sumie co najmniej 9. Różniły się one nieco sekwencją warstw tworzących heterostrukturę, ich szerokością, składem chemicznym, koncentracją gazu elektronowego i geometrią kontaktów i bramek. Szkoda, że w tabeli 1 na stronie 27 autor posługuje się symbolami identyfikującymi płytki materiału wyjściowy (tzw. wafers) a nie symbolami wykonanych z nich próbek (np. P1, HB itd.), którymi posługuje się w dalszych częściach pracy. Tzw. wafer D z rysunku I.2 na stronie 28 jest chyba oznaczony w tejże tabeli symbolem D*, o ile się nie mylę. O ile jest dla mnie jasne, gdzie zostały wyhodowane materiały wyjściowe, to nie znajduję informacji, kto i gdzie wykonał ich mikrostrukturyzację i nanostrukturyzację (nałożenie bramek, wykonanie kontaktów, wykonanie kontaktu punktowego). Zawarte w tej części opisy układów pomiarowych są poprawne i jasne. Nie znajduję informacji w pracy, świadczących o tym, że doktorant miał wkład do ich ulepszenia czy modyfikacji.

Część III rozprawy zawiera zasadnicze wyniki uzyskane w czasie pracy nad doktoratem. W szczególności dokonano wstępnych pomiarów efektu Szubnikowa de Hasa (czyli oscylacji

magnetooporu w funkcji zewnętrznego pola magnetycznego) wyznaczając gęstość gazu elektronowego i masę efektywną nośników w próbkach P1 i P2 (w podpisie rysunku I.2 na stronie 38 próbki te nazwane są z jakiegoś powodu A1 i A2, ale napis na samym rysunku nie pozostawia wątpliwości co do ich identyfikacji) oraz P3 lub P4 i P5 (albo wszystkich trzech – doktorant nie specyfikuje, której/których próbek dotyczą dane przedstawione na rysunku I.4 na stronie 42, pisze tylko, że była to próbka z bramką) oraz HB. Jest to dość standardowe zjawisko i zastosowana przez doktoranta procedura opracowania wyników jest również standardowa. W tej części opisu doktorant pisze na stronie 38, że czas relaksacji pędu elektronów w wyniku rozpraszania nośników – w odróżnieniu od kwantowego czasu relaksacji występującego w wyrażeniu na amplitudę oscylacji w efekcie Szubnikowa de Haasa – ważony jest czynnikiem $(1-\cos\theta)$, gdzie θ to kąt pomiędzy pędem elektronu przed i po zderzeniu. Jest to przejęzyczenie: to jego odwrotność jest ważona tym czynnikiem. Autor stwierdza na stronie 38, że okres oscylacji dany jest przez główny, (dlaczego główny – drugi jest niemal tak samo silny) niskopolowy pik na wykresie transformaty Fouriera oscylacji Szubnikowa de Haasa. Zgadza się z tym stwierdzeniem. Natomiast nie bardzo mogę się zgodzić ze stwierdzeniem, że pik w polu wyższym pochodzi od wyższych harmonicznych i związany jest z rozszczepieniem spinowym stanów elektronowych. Albo jedno albo drugie!

Pomiary na próbce (której?) z bramką pozwalającą na zmianę koncentracji elektronów w obszarze podbramkowym. Niestety nie udało się zaobserwować zmiany okresu oscylacji Szubnikowa de Haasa w pomiarze standardowym tego zjawiska. Spowodowane to było niewielką powierzchnią bramki w porównaniu z powierzchnią całej próbki. Modyfikując sposób pomiaru poprzez pomiary fazoczułe po przyłożeniu dodatkowo sinusoidalnie zmiennego napięcia do bramki doktorant był w stanie wykazać pewną niewielką modyfikację koncentracji wywołaną stałym dużym napięciem na elektrodzie bramki.

Pomiary w próbkach P2 i P5 (w tej drugiej materiał studni kwantowej zawierał jony Mn, niestety nie wiadomo w jakiej ilości) w bardzo silnych polach magnetycznych pozwoliły na zaobserwowanie zjawiska ułamkowego kwantowego efektu Halla poprzez obserwację niewielkiego minimum oporu w polu magnetycznym odpowiadającym czynnikowi wypełnienia $\nu=3/2$. Świadczy to o dobrej jakości tych próbek i o wysokiej ruchliwości dwuwymiarowego gazu elektronowego uwięzionego w studniach kwantowych z CdTe lub CdMnTe. Autor nie zaobserwował anomalii oporu dla innych wartości czynnika wypełnienia. Nieco dziwi fakt, że głębokość minimum oporu przy $\nu=3/2$ jest większa w przypadku próbki P5 niż w przypadku próbki P2, chociaż ta ostatnia nie zawiera Mn w studniach kwantowych i w zasadzie powinna charakteryzować się większą ruchliwością. Czy autor rozprawy ma jakieś sugestie dotyczące tego zagadnienia?

W dalszym podrozdziale autor zajmuje się zjawiskiem polaronowym obserwowanym poprzez pomiary transmisji fal terahertzowych w polu magnetycznym, a w szczególności poprzez obserwację rezonansu cyklotronowego w tym zakresie widmowym w próbce G1 (jak również próbki „referencyjnej” GR nie opisanej chyba w części II pracy doktorskiej, ale wyciętej z tego samego materiału wyjściowego co próbka G1). Stwierdza, że zmiany masy efektywnej obserwowane w eksperymencie są zgodne z przeskalowaną w sensowny sposób teorią wziętą z literatury, a dotyczącą innego materiału półprzewodnikowego, a mianowicie InSe. Drobnym potknięciem w tej części pracy jest powoływanie się w tekście na rysunek II.3 zamiast na rysunek II.2. Linia przerywana narysowana na tym rysunku w tekście nazwana jest „approximated theoretical curve” („krzywa” – choć to przecież prosta). Nie bardzo wiem jak została otrzymana. Pomijam już fakt, że w tekście nazywa się ją „krzywą” (prostą) ω_c a na rysunku jest wykres ν z tyldą w funkcji pola B. Niezbyt jasno napisany jest w tej części

fragment dotyczący roli dodatkowego oświetlenia próbki światłem widzialnym w czasie pomiarów. Rozumiem, że dodatkowe oświetlenie wywołuje zmiany koncentracji quasi-dwuwymiarowego gazu elektronowego (ściślej niewielkie jej zwiększenie). Jest to zjawisko znane i stowarzyszone zazwyczaj ze zmianami ruchliwości elektronów.

Kolejny podrozdział rozpoczyna wątek pomiarów fotoprądu, a więc innej techniki badawczej. I tak zmierzony został indukowany promieniowaniem terahertzowym rezonans cyklotronowy wykrywany tą metodą w próbkach P1, P2 oraz P3 i P4. Zaobserwowany został w tych ostatnich dwóch próbkach silny pik fotoprądu w warunkach rezonansowych (tzn. w polu magnetycznym, w którym odległość pomiędzy poziomami Landaua była równa energii linii lasera terahertzowego), z bardzo niską wartością fotoprądu poza rezonansem. Pozwoliło to na wyznaczenie masy efektywnej elektronów jeszcze jedną metodą. Ciekawym elementem tych badań jest zauważenie różnej zależności amplitudy fotoprądu od mocy promieniowania lasera indukującego go dla różnych długości fali. Autor interpretuje jakościowo te zależności poprzez skorelowanie ich z położeniem rezonansu cyklotronowego w pobliżu maksimum lub minimum lokalnego oporu w funkcji pola magnetycznego. W tych samych próbkach P1 i P2 (ale nie P3 i P4) obserwowane były oscylacje kwantowe fotoprzewodnictwa, które wykazują wiele cech wspólnych z oscylacjami magnetooporu (zjawisko Szubnikowa de Hasa obserwowane wcześniej). Ciekawe jest tu również odwrócenie znaku fotoprądu w funkcji wypełnienia poziomów Landaua, zjawisko znane ze studiów nad gazem elektronowym w heterostrukturach GaAs/GaAlAs. W tej części nie rozumiem stwierdzenia ze strony 59, że po zaabsorbowaniu kwantu promieniowania, elektron przekazuje nadmiar energii w akcie rozpraszania elastycznego. Z definicji rozpraszanie elastyczne zachodzi bez zmiany energii elektronu. Coś tu jest napisane nieściśle lub mamy do czynienia z przejęzyczeniem. Może autorowi chodziło o rozpraszanie nieelastyczne? Autor dokonuje interpretacji pochodzenia oscylacji fotoprądu w funkcji pola magnetycznego (jak również ich braku w próbkach P3 i P4) w oparciu o mechanizmy zaproponowane w literaturze. Choć interpretacja ta jest tylko jakościowa, to jest dość prawdopodobna.

Autor dyskutuje również pojawienie się rozszczepienia pików fotoprądu w polach magnetycznych 6-7 T. Stwierdza przy tym, że rozszczepienie to nie może być związane z rozszczepieniem spinowym, bo nie zgadza się z podwojonym okresem oscylacji w niższych polach magnetycznych. Z takim argumentem nie mogę się zgodzić. Działa on tylko wówczas gdy czynnik g elektronu ma pewne określone wartości, co w ogólności nie musi zachodzić w CdTe i CdMnTe. Wydaje mi się, że nie ma przekonującej interpretacji dyskutowanego zjawiska podanej w pracy. Niemniej przedstawiona dyskusja jest ciekawa i nie nieprawdopodobna.

W ostatnim podrozdziale tej części pracy omawiane są bardzo ciekawe wyniki uzyskane na próbkach G1, G2 i GR, które posiadały metalizację w kształcie podwójnych zazębających się grzebieni na swojej powierzchni, co ułatwiało sprzężenie promieniowania z drganiami plazmy elektronowej. Prowadzono pomiary transmisji promieniowania przez takie próbki i wykryto istnienie całego szeregu wzbudzeń oprócz samego rezonansu cyklotronowego. Wyznaczona została dyspersja obserwowanych modów plazmonowych. Pomiary te uzupełnione zostały niebanalną analizą teoretyczną, która pokazała bardzo dobrą zgodność przybliżonego modelu z obserwacjami. Pokazano, że oddziaływanie z fononami optycznymi ma znaczący wpływ na zmierzoną dyspersję plazmonów. Ta część pracy jest w mojej opinii najbardziej oryginalna i wyrafinowana fizycznie.

W pracy zwraca uwagę wielowątkowość i bogactwo uzyskanych danych pomiarowych. Są one dość starannie przeanalizowane i opracowane numerycznie. Niekiedy jednak ma się wrażenie, że dane te niewiele wnoszą nowego do wcześniej uzyskanych wyników w innych próbkach. Tak jest, na przykład, w próbce z kontaktem punktowym, w której obserwowano rezonans cyklotronowy nośników ładunku (przy pomocy którego wyznaczono masę efektywną elektronów w tej próbce uzyskując jej wartość konsystentną z masami wyznaczonymi w innych próbkach) i mody magnetoplazmonowe wcześniej obserwowane w próbkach z bramkami w kształcie grzebieni. Nie jest to, oczywiście, zarzut w stosunku do samej pracy. Szczegółności w próbce z kwantowym kontaktem punktowym obserwowano więcej modów niż w przypadku próbek G1 i G2. NB ciekaw jestem opinii autora, dlaczego tych modów w próbce QPC widać tak dużo. Dziwi mnie również trochę brak wpływu napięcia na bramce na obserwowane zjawiska w próbce QPC, choć tłumaczenie tego faktu przedstawione w pracy na stronie 81 brzmi przekonująco.

Dwukrotnie w pracy znajduję stwierdzenie, że autor dysponował jeszcze inną serią próbek, w których dwuwymiarowy gaz elektronowy uwięziony był w studniach kwantowych z rozcieńczonego półprzewodnika magnetycznego CdMnTe. Informacja ta jest moim zdaniem bez znaczenia dla samej pracy, która, zgodnie ze swoim tytułem, miała się koncentrować na materiałach niemagnetycznych. Dlatego też braku wyników dla próbek magnetycznych nie uważam za wadę rozprawy. Również włączenie do prezentowanych danych wyników dla próbki P5 (w której gaz elektronowy znajdował się w części struktury domieszkowanej jonami Mn) w zasadzie wybiega poza tematykę określoną w tytule.

Podsumowując, stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji praca doktorska jest obszerna, wyrafinowana doświadczalnie i zawiera szereg oryginalnych rezultatów doświadczalnych. Dane są starannie opracowane i przeanalizowane w ramach istniejących modeli. W mojej opinii praca spełnia wymogi ustawowe i wnioskuję o dopuszczenie mgr. Ignasa Grigelionisa do jej publicznej obrony.

Warszawa, 29 lipca 2015

prof. dr hab. Jacek Kossut