

Warszawa, dnia 5. lipca 2023 r.

Prof. dr hab. Grzegorz Karczewski
Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk
w Warszawie

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Aleksandry Łopion
pod tytułem
**"Rezonanse paramagnetyczne i relaksacja spinowa jonów magnetycznych w
obecności gazu nośników w studniach kwantowych"**

Rozprawa doktorska magister Aleksandry Łopion pt. "Rezonanse paramagnetyczne i relaksacja spinowa jonów magnetycznych w obecności gazu nośników w studniach kwantowych" dotyczy większej ilości zagadnień, niż tylko badań dynamiki spinów jonów manganu umieszczonych w studniach kwantowych CdTe/CdMgTe. Jednakże, głównym celem przeprowadzonych przez doktorantkę badań było określenie, jaki wpływ na proces relaksacji spin-sieć zlokalizowanych spinów magnetycznych manganu wywiera obecność w studni kwantowej swobodnych nośników ładunku (dziur lub elektronów). Główną metodą badawczą zastosowaną w tych badaniach przez autorkę były pomiary optycznego rezonansu magnetycznego (optically detected magnetic resonance, ODMR). Istotnym celem badań autorki było znalezienie korelacji pomiędzy lokalnymi własnościami gazu nośników a zmianami czasu relaksacji spinowej jonów umieszczonych w różnych miejscach studni kwantowej.

Badania półprzewodników półmagnetycznych mają długą historię, zarówno w Polsce jak i na świecie. Również badania struktur niskowymiarowych wytworzonych z tych materiałów nie należą do nowych. Obecnie temat ten nie przyciąga już takiej uwagi fizyków jak przed laty, i w związku z tym trudno zaliczyć go do „gorących” tematów w fizyce ciała stałego. Należy jednak podkreślić, że badania mgr Łopion są nowatorskie ze względu na metodę eksperymentalną, którą zastosowała (ODMR), i dzięki której otrzymała szereg nowych wyników doświadczalnych. Z tego powodu należy docenić podjęcie tego tematu badań, tym bardziej, że badania takie były eksperymentalnie złożone i trudne do prowadzenia. Wymagały one specjalnie zaprojektowanych i precyzyjnie wykonanych próbek,

przewodzenia pomiarów w ekstremalnych warunkach takich jak, bardzo niskie temperatury, silne pola magnetyczne, sprzężenie z mikrofalami i podświetlenie światłem widzialnym. Dodatkowym utrudnieniem była konieczność stosowania i precyzyjnej kontroli impulsów, zarówno mikrofalowych, jak i laserowych w obszarze widzialnym do pomiarów rozdzielonych w czasie. Interpretacja otrzymanych danych doświadczalnych też nie należała do prostych i oczywistych, wymagała ona od autorki dobrego przygotowania teoretycznego.

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska mgr Aleksandry Łopion składa się ze streszczenia dziesięciu rozdziałów oraz obszernej bibliografii liczącej 75 pozycji. W rozdziale pierwszym zdefiniowany jest naukowy cel rozprawy, którym jest zbadanie wpływu nośników ładunku na dynamikę spinów i rezonans paramagnetyczny jonów magnetycznych Mn^{2+} umieszczonych w studniach kwantowych CdTe/CdMgTe, przedstawione jest uzasadnienie podejmowanych badań oraz opisana struktura rozprawy. W przeciwieństwie do celu pracy i szczegółowych zadań, które zostały precyzyjnie określone, uzasadnienie dlaczego ten temat został podjęty nie jest przekonujące.

Rozdział drugi rozprawy przedstawia opis próbek z pojedynczymi studniami kwantowymi CdTe/(Cd,Mg)Te zawierającymi jony magnetyczne manganu oraz kobaltu, które były przedmiotem badań przedstawionych w pracy. W opisie tym brak jest tak istotnych informacji jak szerokości obszarów domieszkowanych Mn w studniach z serii 1498-1502, szczegółów w jaki sposób wyznaczono skład Mn, co oznaczają podane w tabeli koncentracje Mn (średni skład w obszarze całej studni, czy zawartość Mn w obszarze domieszkowanym Mn), etc.

Bardzo ciekawie prezentuje się rozdział trzeci, w którym autorka szczegółowo opisała swoje układy pomiarowe oraz techniki doświadczalne służące do pomiarów optycznych w polu magnetycznym i z wykorzystaniem promieniowania mikrofalowego w celu otrzymania sygnału ODMR. W rozdziale tym opisany został również schemat sekwencji pomiarowych używanych do pomiarów czasowo-rozdzielczych. Niestety, brak jest jednej ważnej informacji, mianowicie czasów narastania i opadania impulsów mikrofalowych, które zazwyczaj nie są zbyt szybkie i mogą uniemożliwiać pomiary szybkich procesów. Nie mam jednak wątpliwości, że ta część rozprawy może być dobrym źródłem informacji o metodzie i układzie pomiarowym.

W rozdziale czwartym omówiono teoretycznie podstawy fizyczne badanych zjawisk, takich jak gigantyczny efekt Zeemana, optycznie wykrywany rezonans magnetyczny, oddziaływanie jonów magnetycznych z nośnikami ładunku — przesunięcie Knighta, relaksacja spin-sieć. Część rozdziału poświęcona jest symulacjom numerycznym, których wyniki pozwalają na ilościowe określenie np. koncentracji gazu nośników w studni kwantowej.

Informacje zebrane i przedstawione w rozdziałach trzecim i czwartym pokazują, że

doktorantka zapoznała się z literaturą przedmiotu, dzięki czemu była dobrze przygotowana do postawionych przed nią zadań badawczych. Zarówno przygotowanie teoretyczne, jak i znajomość układów i technik pomiarowych świadczy o dużej wiedzy teoretycznej i praktycznej doktorantki w dziedzinie, którą się zajmowała oraz o dobrym przygotowaniu do samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

Opis własnych wyników doświadczalnych doktorantki zaczyna się od rozdziału piątego, który poświęcony jest wyznaczaniu energii dysocjacji ekscytynu naładowanego dodatnio, tj. trionu. Jest to zagadnienie ciekawe i ważne, aczkolwiek słabo związane z głównym tematem rozprawy. Doktorantka wyznaczała energię dysocjacji trionu w studniach kwantowych CdMnTe/CdMgTe poprzez obserwację przejścia pomiędzy jego stanem singletowym i trypletowym w funkcji pola magnetycznego. Przejście to manifestuje się zmianą intensywności sygnału fotoluminescencji trionu i ekscytynu. Cennym wynikiem tej części badań doktorantki jest stwierdzenie, że energia dysocjacji trionu słabo zależy od warunków zewnętrznych pomiaru.

W rozdziale szóstym opisana są najpierw badania magnetoptyczne wykonane na serii próbek z jonami magnetycznymi intencjonalnie umieszczonymi w różnych obszarach studni. Najciekawszym, moim zdaniem, wynikiem tych badań jest stwierdzenie, że gigantyczne rozczepienie spinowe obserwowane w badanych studniach kwantowych w istotny sposób zależy od koncentracji dziur (rys. 6.4). Wynik ten byłby bardziej przekonujący, gdyby doktorantka opisała dokładnie, w jaki sposób przesunięcia związane z koncentracją dziur zostały obliczone. Druga część rozdziału szóstego opisuje pierwsze wyniki otrzymane metodą ODMR oraz zależności sygnału ODMR od czasu. Istotnym rezultatem tych pomiarów jest wykazanie, że znormalizowany sygnał ODMR nie zależy od stanu ekscytonowego na którym został zmierzony (rys. 6.5). Drugi ciekawy wynik to odtworzenie kształtu sygnału ODMR i dzięki temu wyznaczenia indukowanego naprężeniem parametru osiowej składowej pola krystalicznego D (rys. 6.6). Ostatnim wynikiem, który opisany został w tej części rozprawy jest zależność czasu relaksacji spin-sieć od pola magnetycznego oraz przekrycia pomiędzy stanem ekscytonowym a obszarem domieszkiowania jonami manganu.

Rozdział siódmy poświęcony został opisowi wpływu swobodnych dziur na przyspieszenie relaksacji spinowej jonów manganu oraz zmianę pola rezonansu paramagnetycznego w pomiarach ODMR. Sygnał ODMR rejestrowany był poprzez pomiar zmian widm odbicia przy obecności dodatkowego podświetlenia zmieniającego koncentrację nośników, oraz pomiary fotoluminescencji dla różnych mocy i energii pobudzenia. Zbadano także zależność zmian efektywnego g-czynnika i przesunięcia Knighta od kierunku zewnętrznego pola magnetycznego. Obecność swobodnych dziur w studniach kwantowych i ich koncentracja powoduje wyraźne przesunięcie sygnału na liniach ekscytynu neutralnego i naładowanego oraz na znaczne skrócenie czasu relaksacji spin-sieć.

Rozdział ósmy, podobnie jak rozdział poprzedni, poświęcony został opisowi wpływu swobodnych nośników na przyspieszenie relaksacji spinowej jonów manganu oraz zmianę pola rezonansu paramagnetycznego w pomiarach ODMR. Tym razem jednak w studniach kwantowych obecny był gaz elektronowy a nie dziurowy, jak poprzednio. Gaz elektronowy w studni i możliwość jego kontroli doktorantka uzyskała dzięki umieszczeniu metalicznej bramki na powierzchni próbki. Bramka ta wytworzona była przez pokrycie powierzchni metaliczną warstwą niklu. Efekty związane z oddziaływaniem jonów magnetycznych z gazem elektronowym okazały się znacznie słabsze niż w przypadku oddziaływań z dziurami. Zmiana czasu relaksacji spin-sieć okazała się niewielka, czego należało oczekiwać biorąc pod uwagę, że siła oddziaływań wymiany jonów manganu elektronami jest znacznie mniejsza niż z dziurami.

Rozdział dziewiąty zawiera opis badań relaksacji spinowej jonów w studni zawierającej jony manganu i kobaltu wykonane przy użyciu techniki opierającej się na depolaryzacji poprzez silny impuls laserowy. Dodatek nawet bardzo małej koncentracji jonów kobaltu do próbki ze znaczącą zawartością jonów manganu sprawia, że proces relaksacji spinowej robi się dużo szybszy i wielowykładniczy. Obserwacja ta sugeruje, że jony kobaltu działają jako centra relaksacji spinowej dla systemu jonów Mn^{2+} . Rozdział ósmy zawiera także rozważania na temat ograniczeń techniki ODMR.

Rozdział dziesiąty, ostatni, stanowi krótkie podsumowanie rozprawy. Do najciekawszych osiągnięć i wyników uzyskanych przez mgr Aleksandrę Łopion przedstawionych w jej rozprawie doktorskiej zaliczył bym:

- Opracowanie metody pomiarów czasowo-rozdzielczego ODMR w pomiarach fotoluminescencyjnych i odbiciowych,
- Wyznaczenie energii dysocjacji trionu poprzez pomiary przejścia między stanem tripletowym i singletowym w polu magnetycznym,
- Wykazanie, że energia dysocjacji trionu nie zależy od różnicy energii ekscytonu i trionu w zerowym polu magnetycznym (rys 5.6),
- Wyznaczenie zależności rozczepienia Zeemana od koncentracji dziur w studni kwantowej (rys. 6.4),
- Pokazanie, że znormalizowany sygnał ODMR jest taki sam niezależnie od stanu ekscytonowego (rys. 6.5d)
- Odtworzenie kształtu linii ODMR i wyznaczenie parametru naprężenie jednoosiowego pola krystalicznego D (rys. 6.6)
- Zmierzenie czasu relaksacji spin-sieć w funkcji pola magnetycznego i powiązanie tej zależności z przekryciem stanów ciężko-dziurowych z obszarem domieszkowanym jonami Mn (rys 6.8)

- Oszacowanie efektywnej temperatury jonów Mn i nośników w warunkach oświetlenia mikrofalami i promieniowaniem widzialnym
- Zbadanie wpływu nośników ładunku obecnych w studni kwantowej na prędkość zależności relaksacji spin-sieć jonów magnetycznych manganu,
- Zbadanie zależności przesunięcia Knighta od kąta θ przyłożonego pola magnetycznego.
- Obserwacja przyspieszenia relaksacji spin-sieć w zależności od pobudzania – przyspieszenie czasów relaksacji w obecności nośników
- Wytworzenie struktury a barierą Schottkiego, która daje możliwość zmiany pola elektrycznego w próbce i koncentracji nośników (elektronów) w obszarze studni kwantowej.
- Wyznaczenie czasów relaksacji spin-sieć w zależności od napięcia bramki w diodach Schottkiego
- Stwierdzenie, że dodatkowe jony kobaltu w układzie działają jak centra relaksacji spinowej dla jonów Mn powodując znaczne przyspieszenie relaksacji spin-sieć.

Reasumując, prace badawcze opisane w rozprawie doktorskiej mgr. Aleksandry Łopion przyniosły szereg ciekawych i wartościowych rezultatów. Autorka zasługuje na szczególne uznanie, ponieważ pomiary i eksperymenty, które przeprowadziła należą do trudnych i pracochłonnych, a trzeba przyznać, że przeprowadziła ich bardzo dużo i starannie. Świadczy to, że autorka jest zdolną, cierpliwą i pracowitą eksperymentatorką. Również przedstawiona interpretacja i dyskusja wyników doświadczalnych są na wysokim poziomie. Nie mam zastrzeżeń dotyczących edycji rozprawy i prezentacji wyników. Rozprawa napisana jest starannie, wykresy są przejrzyste i dobrze opisane.

Z obowiązku recenzenta muszę zwrócić uwagę i prosić o wyjaśnienie kilku kwestii, które budzą moje wątpliwości:

- W jaki sposób wyznaczona została zawartość Mn w próbkach z niejednorodnym rozkładem w obszarze studni; czy podane wartości to koncentracja średnia w całym obszarze studni, czy też koncentracja w obszarze domieszkowania,
- Jak obliczone zostały poprawki pochodzące od obecności nośników do rozczepienia Zeemana przedstawione na rys 5.6,
- Wydaje mi się, że schemat pasmowy złącza Schottkiego przedstawiony na rys 8.1 jest nieprawidłowy. Tak jak to przedstawiono w tym rysunku byłoby, gdyby bariery CdTe były silnie domieszkowane na typ n, a nie jest to ten przypadek.

- Przesadne wydaje się stwierdzenie, że na podstawie danych przedstawionych na rys 6.2a, wynik jest zgodny jakościowo z modelem. Nasuwa się pytanie jak wyglądają rozczepienia Zeemana dla pozostałych próbek z tej serii, czyli struktur z innym rozkładem jonów Mn.
- Również wyniki z rys 6.3a mogą być tak interpretowane jak przedstawia autorka, tylko przy silnym założeniu, że koncentracja Mn w wszystkich próbach jest dokładnie taka sama. I znowu, o jakiej koncentracji jest mowa.

Mimo wymienionych wyżej niedociągnięć, przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr Aleksandry Łopion stanowi istotny wkład w badania oddziaływań wymiany pomiędzy jonami magnetycznymi a ekscytonami w półprzewodnikowych strukturach dwuwymiarowych. Oceniam pracę doktorską mgr Aleksandry Łopion bardzo wysoko.

Podsumowując stwierdzam, że przedmiotem rozprawy mgr Aleksandry Łopion jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Jak wspomniałem powyżej, rozprawa prezentuje również ogólną wiedzę teoretyczną doktorantki w dyscyplinie fizyki ciała stałego oraz umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Zatem rozprawa te spełnia wszelkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim i zgodnie z Ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (tekst jednolity: Dz. U. z 2023 r. poz. 742 z późn. zm.), wnioskuję do Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Fizyczne Uniwersytetu Warszawskiego o dopuszczenie mgr Aleksandry Łopion do dalszych etapów postępowania doktorskiego.



Grzegorz Karczewski