

Dr hab. inż. Leszek Bryja, prof. uczelni
Katedra Fizyki Doświadczalnej
Wydział Podstawowych Problemów Techniki
Politechnika Wrocławska

Wrocław, 17.07.2023 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Aleksandry Łopion zatytułowanej:
„Rezonanse paramagnetyczne i relaksacja spinowa jonów magnetycznych w obecności
gazu nośników w studniach kwantowych”**

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr Aleksandry Łopion została wykonana w Instytucie Fizyki Doświadczalnej Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Promotorem pracy był prof. dr hab. Andrzej Golnik.

Tematyka rozprawy dotyczy aktualnych zainteresowań środowisk naukowych związanych z badaniami podstawowych właściwości fizycznych szerokiej klasy tzw. rozcieńczonych półprzewodników magnetycznych (ang. diluted magnetic semiconductors), nazywanych również półprzewodnikami półmagnetycznymi (ang. semimagnetic semiconductors). Materiały te wykazują niezwykle ciekawe własności zarówno w formie objętościowej jak i w strukturach o obniżonej wymiarowości.

Grupy badawcze z Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego jak i całego środowiska naukowego Warszawy włączyły się od samego początku w światowe badania tych materiałów. Badania rezonansu paramagnetycznego i relaksacji spinowej w obecności gazu nośników w studniach kwantowych związków II-VI przeprowadzone przez doktorantkę znakomicie wpisują się w kontynuację i rozszerzenie tych badań.

Wyniki przedstawione przez doktorantkę w rozprawie doktorskiej zostały częściowo opublikowane w 3 artykułach: 2 w Physical Review B 106 (2022) i Physical Review B 105 (2022) oraz w Journal of Electronic Materials 49 (2020). W dwóch pracach doktorantka jest pierwszym autorem a w jednym drugim. Poza tymi pracami doktorantka jest współautorem w 3 innych artykułach. Jej indeks Hirsha wynosi $h=2$ a liczba cytowań 7 (5 bez autocytowań).

Rozprawa doktorska mgr Aleksandry Łopion poświęcona jest badaniom oddziaływań jonów magnetycznymi Mn^{2+} z nośnikami ładunku w pojedynczych w studniach kwantowych $Cd_{1-x}Mn_xTe$ z barierami z $Cd_{1-x}Mg_xTe$ z niską koncentracją jonów magnetycznych ($x \leq 0,5\%$). Metodą pomiarową używaną w pracy była optycznie wykrywany rezonans magnetyczny (ang.

optically detected magnetic resonance - ODMR) w pomiarach widm fotoluminescencji i odbicia. Doktorantka zbadała zależność pola rezonansu spinowego i relaksacji spin-sieć od koncentracji i typu nośników w próbce, tzw. przesunięcie Knighta. Koncentracja nośników w próbkach z dwuwymiarowym gazem dziurowy była zmieniana przy pomocy dodatkowego pobudzania laserem o energii fotonów powyżej przerwy bariery a koncentracja dwuwymiarowego gazu elektronowego była zmieniana napięciem bramki w specjalnie przygotowanej strukturze z diodą Schottky'ego.

Rozprawa doktorska mgr Aleksandry Łopion składa się z dziewięciu rozdziałów, dziesiątego rozdziału podsumowania i liczy sto trzydzieści sześć stron, łącznie z bibliografią.

We rozdziale pierwszym doktorantka przedstawiała cel rozprawy, uzasadnienie podjęcia problematyki badawczej i krótko opisała strukturę pracy. Doktorantka przedstawiła dwa główne zadania rozprawy. Pierwszym było szczegółowe określenie wpływu lokalnej gęstości nośników ładunku na sygnał rezonansu magnetycznego związanego z jonami magnetycznymi umieszczonymi w różnym miejscach w studni kwantowej, a drugim zbadanie mechanizmów relaksacji spin-sieć jonów manganu związanych z ich oddziaływaniem z nośnikami ładunku, przy niskich koncentracji jonów oraz niskich i średnich koncentracjach nośników. Doktorantka zamierzała również zbadać korelację pomiędzy lokalnymi właściwościami gazu nośników i zmianami czasu relaksacji spinowej jonów umieszczonych w różnych miejscach w studni kwantowej. Przy opisie struktury pracy w pierwszym rozdziale zatytułowanym „Wstęp” pojawiła się pewna niekonsekwencja bo doktorantka zmieniła numerację rozdziałów zmniejszając ją o jeden, pomijając numerację „Wstępu” mimo, że w pracy są one ponumerowane od pierwszego rozdziału „Wstępu”. W dalszej części recenzji będę się odnosił do numeracji w podanej w pracy a nie we „Wstępie”.

W rozdziale drugim zatytułowanym „Próbki” doktorantka opisała badane próbki. Wszystkie próbki były wytworzone metodą epitaksji z wiązek molekularnych (ang. molecular beam epitaxy – MBE). Były to studnie $\text{Cd}_{1-x}\text{Mg}_x\text{Te} / \text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te} / \text{Cd}_{1-x}\text{Mg}_x\text{Te}$, które skrótowo będę w dalszej części recenzji nazywał $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te} / \text{Cd}_{1-x}\text{Mg}_x\text{Te}$, o dwóch szerokościach studni $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ równych 10 i 20 nm wyhodowane na przewodzącym(półizolującym) lub nieprzewodzącym podłożu GaAs. Zawartość molowa jonów Mn^{+2} była niska i zawarta w przedziale od 0,18 do 0,5 % co powodował, że znajdowały się one daleko od siebie i zachowały się jak jony paramagnetyczne, nieoddziaływujące między sobą. Wyhodowano cztery rodzaje próbek z jonami manganu w: (1) całej przestrzeni studni, (2) środku studni, lub blisko bariery studni (3) dolnej, lub (4) górnej. Próbek tych było 10. Doktorantka zbadała również 3 struktury z jonami manganu i kobaltu umieszczonymi w studni kwantowej.

W rozdziale trzecim doktorantka opisała układy doświadczalne i techniki pomiarowe służące do pomiarów optycznych w polu magnetycznym z wykorzystaniem promieniowania mikrofalowego w celu otrzymania sygnału optycznie wykrywanego rezonansu magnetycznego (ODMR). Układ pomiarowy używany przez doktorantkę składa się z dwóch części: części magneto optycznej, która pozwala na uzyskanie informacji o stopniu namagnesowania próbki oraz z części mikrofalowej, która poprzez doprowadzanie promieniowania mikrofalowego do próbki pozwala na zmianę namagnesowania systemu. Doktorantka szczegółowo opisała współdziałanie tych dwóch podukładów umożliwiające uzyskanie silnego sygnału ODMR. Omówiła też metodę pomiarową sygnału ODMR, która polegała na badaniu przesunięcia położenia linii widmowych kompleksów ekscytonowych w warunkach rezonansu paramagnetycznego.

Układ pomiarowy używany przez doktorantkę został dodatkowo zmodyfikowany, tak aby umożliwić dostarczanie promieniowania laserowego oraz mikrofalowego w trybie impulsowym. Najważniejszą zaletą modulacji czasowej impulsów laserowego o mikrofalowego jest możliwość prowadzenia dodatkowych pomiarów czasoworozdzielczych. Pomiary były przeprowadzone w temperaturze nadciekłego helu w dwóch magnesach nadprzewodzących. Jeden z polem magnetycznym do 3 T umożliwiał pomiary wektorowe, tzn. zmianę kierunku pola magnetycznego a drugi umożliwiał pomiary do 10 T. Pomiary były przeprowadzane głównie w konfiguracji Fradaya, ale jak było to konieczne również w konfiguracji Voigta. Opis układów pomiarowych i technik eksperymentalnych jest w pełni wyczerpujący.

W rozdziale czwartym doktorantka wprowadziła teoretycznie podstawy fizyczne badanych zjawisk. Badane przez doktorantkę studnie $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}/\text{Cd}_{1-x}\text{Mg}_x\text{Te}$ z jonami magnetycznymi są unikalną platformą dla badań oddziaływań pomiędzy systemem zlokalizowanych momentów magnetycznych a systemem nośników prądu w strukturze o obniżonej wymiarowości. Te dwa systemy silnie na siebie oddziałują. Nośniki prądu mogą wpływać na zachowanie jonów magnetycznych na różne sposoby, na przykład zmieniać dynamikę spinu jonu magnetycznego. Zagadnienia te były badane i poznane w wielu pracach ale niektóre zagadnienia nie zostały jeszcze w pełni poznane lub zostały poznane słabo. Doktorantka za cel swojej pracy wybrała zbadanie oddziaływań systemów zlokalizowanych jonów z systemem nośników swobodnych w reżimie pośredniej gęstości nośników ładunku. W kolejnych podrozdziałach doktorantka wprowadziła podstawowe pojęcia i metod obliczeniowe opisujące te zagadnienia. W pierwszym podrozdziale doktorantka opisała gigantyczny efekt Zeemana występujący w tych strukturach. Opisała oddziaływanie wymiany, które w tych materiałach opisuje się poprzez Hamiltonian Heisenberga. Opisała funkcje falowe pasm przewodnictwa i walencyjnego, całki wymiany i funkcję Brillouina opisującą zachowanie jonów magnetycznych Mn w funkcji temperatury i

pola magnetycznego. Przedstawiła również reguły wyboru dla dipolowych przejść optycznych pomiędzy pasmami walencyjnym i przewodnictwa. Doktorantka przedstawiła swoje własne obliczenia numeryczne opisujące: funkcje falowe i energie stanów kwantowych w studni kwantowej dla elektronów i dziur jak również energie wiązania ekscytonów, tj. kulombowsko związanych par elektron dziura. Przedstawiła wyniki energii wiązania ekscytonów zarówno dla wiązań elektronów z ciężkimi jak i lekkimi dziurami. Podrozdział ten mógłby być bardziej rozbudowany, np. doktorantka mogłaby podać zarówno energie stanów elektronów i dziur na poszczególnych stanach kwantowych jak również bardziej szczegółowo opisać jak liczyła energie wiązania ekscytonów. Następnie doktorantka opisała fizyczne podstawy optycznie wykrywanego rezonansu magnetycznego jak również podała jakie są zalety pomiaru absorpcji promieniowania techniką ODMR w stosunku do bezpośredniego pomiaru techniką elektronowego rezonansu paramagnetycznego (ang. Electron Paramagnetic Resonance – EPR). Główną zaletą pomiarów ODMR jest fakt, że w technice tej próbkuje się jedynie jony magnetyczne w małej objętości oddziałuje z fotonami, a nie jak w technice EPR jony magnetyczne w całej próbce, łącznie z tymi, które są wbudowane w inne warstwy nanostruktury, przez co może być zaburzony sygnał pochodzący z badanej studni kwantowej. Doktorantka wprowadziła hamiltonian jonu manganu i szczegółowo opisała wszystkie jego składniki. Następnie opisała efekt przesunięcia Knighta. Efekt ten związany jest polaryzacją spinów swobodnych nośników w zewnętrznym polu magnetycznym, które z kolei oddziałują na system zlokalizowanych momentów magnetycznych jako dodatkowe pole magnetyczne. Efekt dodatkowego pola magnetycznego swobodnych nośników ładunku powoduje przesunięcie pomiędzy rezonansem magnetycznym próbkowanym przy nieobecności i w obecności nośników. Opis tego zjawiska w badanych przez doktorantkę strukturach jest szczegółowy i wystarczający. Na koniec tego podrozdziału doktorantka przedstawiła własne obliczenia symulacji numerycznych sygnałów ODMR badanych struktur w funkcji kierunku i wartości pola magnetycznego, częstotliwości mikrofal używanych w eksperymencie jak i parametrów opisujących badane struktury. W ostatnim podrozdziale doktorantka opisała problem relaksacji spinu jonów manganu na skutek oddziaływań z siecią krystaliczną i swobodnymi nośnikami. Przedstawiła ten problem zarówno dla przypadku niskich i wysokich pól magnetycznych.

W rozdziale piątym doktorantka badała kompleksy ekscytonów: neutralnego (X) i dodatnio naładowanego ekscytonu (X^+), oznaczonego również jako CX (ang. charged exciton) w różnych studniach $Cd_{1-x}Mn_xTe/Cd_{1-x}Mg_xTe$. Kompleks ekscytonu naładowanego nazywa się często trionem (T), od występowania trzech kulombowsko związanych cząstek w kompleksie. Dokto-

rantka zajęła się w szczególności problemem energii wiązania dodatkowej dziury do neutralnego ekscytonu w kompleksie X^+ . Doktorantka przeprowadziła badania niskotemperaturowych widm fotoluminescencji (ang. photoluminescence – PL) z różnych studni kwantowych w funkcji pola magnetycznego i koncentracji gazu dwuwymiarowych dziur, których koncentrację zmieniała poprzez pobudzanie fotoluminescencji laserami o różnych energiach powyżej energii bariery. Wykorzystała obserwowaną poprzednio własność, że wraz ze wzrostem energii lasera pobudzającego rośnie koncentracja gazu dziur w studni kwantowej. Na podstawie analizy widm PL dla wielu próbek doktorantka doszła do wniosku, że odległość spektralna pomiędzy X i CX (X^+) nie jest dobrą miarą energii dysocjacji ekscytonu naładowanego (X^+). Doszła do słusznego wniosku, że dobrą metodą badania energii wiązania ekscytonu naładowanego (X^+) jest zbadanie jego energii dysocjacji poprzez obserwację w widmie PL zmiany intensywności linii X i X^+ . Ze wzrostem pola magnetycznego silnie rośnie rozszczepienie Zeemana dziur i po przekroczeniu pewnego pola energia rozszczepienia Zeemana jest większa niż kulombowska energia wiązania dodatkowej dziury na stanie singletowym trionu i kompleks ten rozpada się na neutralny ekscyton i dziurę ($X^+ \rightarrow X + h$), przy czym obie dziury znajdują się po rozpadzie kompleksu X^+ w tym samym niższej energetycznym stanie spinowym. Przejście to obserwuje się jako zmianę wzajemnej intensywności fotoluminescencji X i X^+ , tzn. po przekroczeniu pewnego pola magnetycznego intensywność fotoluminescencji X silnie rośnie a X^+ maleje przy dalszym wzroście pola magnetycznego. Doktorantka nazywa ten efekt przejściem singlet-triplet, tak jak zostało ono nazwane w poprzednich pracach. Nazwa ta jest trochę myląca, gdyż sugeruje, że mamy do czynienia z przejściem pomiędzy stanami spinowego singletu i spinowego tripletu naładowanego ekscytonu, tzn. że oba stany: singletowy i tripletowy są związanymi kulombowsko. Rzeczywiście przejście takie jest obserwowane w literaturze, również przez recenzenta, w studniach kwantowych GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs (Phys. Rev. B 75, 035308 (2007)). Być może przejście takie występuje również w badanych przez doktorantkę strukturach studni Cd_{1-x}Mn_xTe/Cd_{1-x}Mg_xTe, ale ze względu na słabszą jakość tych struktur niż struktur studni GaAs nie obserwuje się w widmie PL trionu na stanie tripletowym. Nie jest to zarzut ale zwrócenie uwagi, że przejście singlet-triplet jest różnie interpretowane w różnych strukturach studni kwantowych. Metoda wyznaczenia energii wiązania dodatkowej dziury w kompleksie X^+ poprzez wyznaczenie energii dysocjacji kompleksu X^+ jest poprawna, natomiast zastrzeżenia powoduje sposób wyznaczenia położenia energetycznego linii X^+ . Wydaje się, że w części studni energii ta wyznaczona jest niepoprawnie. Mianowicie, doktorantka pisze wprawdzie, że w badanych strukturach występują również kompleksy ekscytonów związanych na domieszkach, tj. ekscytony zlokaliz-

zowane na akceptorach (AX) i donorach (DX), ale na rysunkach nigdzie ich nie zaznacza. Zdaniem recenzenta kompleks AX jest widoczny w widmach kilku próbek. Na rysunku 5.1 (b) kompleks ekscytonu AX (lub AX^+) widoczny jest w widmie PL w polach powyżej 0,5 T. Na rys. 5.4 (a) AX jest widoczny w widmie PL przy pobudzaniu linią laserową 647 nm a na rys. 5.4 (c) w widmie PL w polu magnetycznym 2T. Doktorantka pisze wprowadzie, że linie X^+ mają domieszkę linii AX, ale wyznacza położenie linii X^+ nie uwzględniając tego faktu i dlatego odległość energetyczna linii X i X^+ jest dla pewnych próbek zawyżona, tzn. wyznaczona energia emisji X^+ jest albo energią emisji AX (rys. 5.4 (c), PL w $B=2T$) albo maksimum emisji przypisywane linii X^+ jest właściwie superpozycją emisji linii X^+ i AX. Mogą występować pewne fluktuacje położenia linii X^+ , ale wyznaczenie odległości energetycznej linii X i X^+ na 3,68 meV w próbce UW0676 w polu 2T jest niepoprawne bo jest to odległość energetyczna linii X i AX. Ta krytyczna uwaga nie umniejsza jednak wartości wyników uzyskanych przez doktorantkę a jedynie zwraca uwagę, na zachowanie pewnej „czujności” przy interpretowaniu wyników widm PL w strukturach, w których dochodzi do silnej zmiany intensywności poszczególnych linii wskutek zmiany pola magnetycznego i koncentracji nośników, zwłaszcza, gdy zmiana koncentracji nie jest w pełni kontrolowana.

W rozdziale szóstym doktorantka przeprowadziła badania rozkładu czasu relaksacji i naprężeń wzdłuż osi wzrostu studni kwantowej. Badanie lokalnych właściwości było możliwe dzięki wykorzystaniu serii próbek z jonami magnetycznymi intencjonalnie umieszczonymi w wybranych położeniach w studni oraz wykorzystanie techniki optycznie wykrywanego rezonansu magnetycznego. Doktorantka skonstruowała specjalny układ do badań widm odbicia gdyż w przeciwieństwie do pomiarów fotoluminescencji, w których obserwuje się jedynie przejście z najniższego stanu ekscytonowego, w pomiarach odbicia obserwuje się również stany wzbudzone ekscytonów z różnym przestrzennym rozkładem prawdopodobieństwa kolejnych stanów, co pozwala na próbkowanie różnych miejsc w studni kwantowej. Zatem poprzez badanie sygnału ODMR przy obserwacji wyższych stanów dziurowych otrzymuje się dostęp do innych objętości studni, niż gdy obserwujemy jedynie stan podstawowy, którego maksimum rozkładu prawdopodobieństwa przypada na środek studni kwantowej. Pomiar sygnału ODMR pozwoliły nie tylko na zbadanie rozkładu naprężeń w strukturze studni kwantowej ale także oddziaływań jonów magnetycznymi z nośnikami ładunku. Oba te efekty wpływają na czas na czas relaksacji spinowej jonów. Próbkowanie naprężeń i czasu relaksacji spinowej wzdłuż osi wzrostu studni w pomiarach ODMR było możliwe dzięki intencjonalnemu umieszczeniu jonów w różnych objętościach studni kwantowej. Na podstawie dokładnej analizy sygnału ODMR

doktorantka doszła do wniosku, że naprężenia w strukturach nie zmieniało się wzdłuż osi wzrostu a zatem struktury były dość jednorodne. Jest to bardzo ważny wynik zarówno dla dalszych badań podstawowych jak i przewidywanych zastosowań aplikacyjnych badanych struktur. Dodatkowo doktorantka zaobserwowała, że w badanych próbkach oddziaływanie pomiędzy jonami a nośnikami ładunku jest znaczące, nawet mimo niewielkiej koncentracji gazu dziurowego. Pole elektryczne powstające wskutek obecności nośników w studni oraz na powierzchni struktury zmienia kształt funkcji falowych nośników prądu co z kolei wpływa na zmianę ich przekrycia z jonami magnetycznymi. Efekty związane z oddziaływaniem z nośnikami były dobrze widoczne w niskich polach magnetycznych. Doktorantka zaobserwowała, że głównym czynnikiem, który rozróżniał badane próbki było przekrycie pomiędzy jonami magnetycznymi a gazem dziurowym.

W rozdziale siódmym doktorantka badała wpływ nośników ładunku na przyspieszenie relaksacji oraz zmianę pola rezonansu paramagnetycznego, to jest efekt przesunięcia Knighta związany ze zmianą efektywnego g-czynnika jonów magnetycznych wskutek oddziaływania z gazem dziur w studni kwantowej. Wyniki opisane w tym rozdziale uważam za najbardziej wartościowe osiągnięcia doktorantki. Główne wyniki tych badań zostały opublikowane w artykule w *Phys. Rev. B* w 2022 r., w którym doktorantka jest zarówno pierwszym jak i korespondencyjnym autorem. Badania ODMR były wykonywane poprzez pomiar zmian widm odbicia – przy obecności dodatkowego podświetlenia zmieniającego koncentrację nośników, oraz fotoluminescencji przy zastosowaniu różnych mocy i energii pobudzania lasera. Doktorantka zbadała również zależność zmian kształtu widma ODMR i przesunięcia Knighta od kierunku zewnętrznego pola magnetycznego. W pomiarach ODMR zaobserwowała dwa główne efekty oddziaływania dziur z jonami magnetycznymi w studni. Pierwszy efekt pokazuje widoczne przesunięcie sygnału ODMR mierzonego na linii ekscytynu neutralnego i naładowanego w kierunku niższych pól magnetycznych. Drugi efekt związany jest ze znacznym przyspieszeniem relaksacji spin - sieć jonów magnetycznych w obecności dziur w studni kwantowej. Badania przedstawione przez doktorantkę w tym rozdziale są bardzo dogłębne i szczegółowe. Pokazały, że badany system jest złożony z podukładów o różnych temperaturach efektywnych, przez co pomiar i analiza sygnału ODMR wymaga odpowiedniego doboru warunków pomiarów i bardzo szczegółowej analizy co doktorantka wykonała w sposób jak najbardziej prawidłowy. Doktorantka wykonała również obliczenia numeryczne obserwowanych efektów.

W rozdziale ósmym doktorantka prezentuje wyniki badania wpływu nośników na jony magnetyczne w studni kwantowej z gazem elektronowym. Gaz elektronowy w studni o kontrolowanej koncentracji był otrzymany dzięki wykonaniu struktury z bramką otrzymanej poprzez

pokrycie powierzchni próbki półprzewodnikowej metaliczną warstwą niklu. Doktorantka potwierdziła obecność gazu elektronowego w studni w badaniach magnetoptycznych. Oddziaływanie jonów manganu z elektronami w studni są znacznie słabsze niż z dziurami co wynika ze znacznie słabszego oddziaływania wymiany elektronów z manganami (całka wymiany i rozszczepienie Zeemana około 4 razy mniejsze niż odpowiednie wielkości dla dziur) i dlatego też efekty związane z oddziaływaniem jonów z elektronami są znacznie słabsze, niż w przypadku oddziaływania z gazem dziurowym. Doktorantka nie zaobserwowała różnicy pola rezonansu dla sygnałów ODMR otrzymanych na ekscytynie neutralnym X i naładowanym CX (tu ekscyton naładowany ujemnie - X^-). Zaobserwowała niewielką zmianę czasu relaksacji spinowej w obecności nośników – ok. 10% dla linii ekscytynu neutralnego dla przypadku przeładowanej i nieprzeładowanej próbki, podczas gdy dla przypadku gazu dziurowego było to ok. 20%. Doktorantka wyciągnęła stąd wniosek, że gaz elektronowy powoduje mniej efektywną relaksację jonów manganu w porównaniu z gazem dziurowym.

Rozdział dziewiąty stanowi opis badań relaksacji spinowej jonów w studni zawierającej jony manganu i kobaltu wykonane przy użyciu techniki opierającej się na depolaryzacji poprzez silny impuls laserowy. Badania te były jednym z celów pracy doktorskiej, tj. zbadanie przy pomocy techniki ODMR oddziaływania jonów magnetycznych kobaltu Co^{2+} z gazem nośników w studni kwantowej. Jon kobaltu (w przeciwieństwie do jonu Mn^{2+} z zerowym momentem orbitalnym na powłoce d) ma niezerowy moment orbitalny powłoki d i stan podstawowy tego jonu jest dużo bardziej czuły na naprężenie w strukturze, niż ma to miejsce w przypadku jonu Mn^{2+} , co stwarzało nadzieję na znaczne podniesienie czułości metody ODMR do badań lokalnych naprężeń w próbkach z jonami Co^{2+} , przy jednoczesnym wykorzystaniu jonów Mn^{2+} do skalibrowania pomiaru naprężenia. Niestety obecność jonów kobaltu w strukturze powoduje silne gaszenie fotoluminescencji ekscytonowej w studni, gdyż przejście wewnątrz centrowe w jonach kobaltu mają niższą energię niż energie odpowiednich przejść ekscytonowych. Co ciekawe efekt ten nie występuje dla jonów manganu gdyż przejście wewnątrz centrowe w jonach manganu ma energię równą około 2 eV a więc większą niż obserwowane w badanych strukturach energie przejść ekscytonowych. Zatem, aby nie doszło do całkowitego wygaszenia fotoluminescencji doktorantka zbadała struktury o bardzo małej zawartości jonów kobaltu co niestety powoduje, że badane efekty magnetoptyczne trudniejsze do zaobserwowania. Mimo tych trudności doktorantce udało się zaobserwować kilka ciekawych efektów związanych z obecnością jonów kobaltu w studni kwantowej. Zaobserwowała, że czas relaksacji spinowej jonów kobaltu jest dużo szybszy niż w przypadku jonów manganu, nawet przy bardzo małych koncentracjach. Dodatkowo zaobserwowała, że 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. Wyciągnęła stąd wniosek, że jony kobaltu działają jako centra relaksacji spinowej dla systemu jonów Mn^{2+} . Dodatkowo, zauważając, że nawet tak niskie koncentracje jonów kobaltu jak badane w pracy, wpływają na relaksację jonów manganu doktorantka wyciągnęła wniosek, że oddziaływania kobaltu i manganu są daleko zasięgowe. Zaproponowała, że potencjalnym mechanizmem takiego oddziaływania mogą być naprężenia propagującego się w sieci wywoływane przez jon kobaltu w pozycji kationu.

W ostatnim dziesiątym rozdziale doktorantka podsumowała wyniki swoich badań zawartych w rozprawie doktorskiej. Przedstawiła również oryginalne wyniki swojej rozprawy doktorskiej, jak również działania podjęte w celu uzyskania tych wyników, którymi są: (1) wykorzystanie techniki czasoworozdzielczego ODMR do badania czasów relaksacji spin - sieć, (2) wykorzystanie jonów magnetycznych do badania lokalnych naprężeń w nanostrukturach, (3) wykorzystanie sygnału ODMR do badań oddziaływań jonów magnetycznych z gazem nośników, (4) obliczenia numeryczne, (5) badania wpływu niewielkiej domieszki jonu kobaltu na relaksację spinową jonów manganu.

W przedstawionej recenzji nie pojawiają się uwagi krytyczne, oprócz uwagi o wyznaczeniu energii przejść ekscytonów X^+ i AX , co jest wynikiem wysokiego poziomu rozprawy doktorskiej. Praca jest napisana starannie i poprawnie od strony językowej. Również szata graficzna pracy jest imponująca.

W podsumowaniu, oceniam bardzo wysoko wyniki uzyskane przez doktorantkę. Wyniki otrzymane przez doktorantkę są oryginalne. Doktorantka wykonała bardzo dogłębne badania rezonansu paramagnetycznego i relaksacja spinowej jonów magnetycznych w obecności gazu nośników w studniach kwantowych $Cd_{1-x}Mn_xTe/Cd_{1-x}Mg_xTe$ oraz przeprowadziła bardzo szczegółową analizę otrzymanych wyników eksperymentalnych. Wykonała też obliczenia numeryczne stanów nośników w studni z polem elektrycznym, zmian kształtu funkcji falowych i ich przekrycia z poszczególnymi obszarami studni wzdłuż osi kwantyzacji w zależności od koncentracji nośników oraz zmiany widma ODMR w zależności od kąta przyłożonego pola magnetycznego i temperatury, przy braku oddziaływania z nośnikiem i w obecności nośnika.

Część z otrzymanych przez doktorantkę wyników jest nowa, a część jest powtórzeniem i rozszerzeniem wyników otrzymanych przez innych autorów, co nie umniejsza wartości pracy, gdyż struktury studni kwantowych $Cd_{1-x}Mn_xTe/Cd_{1-x}Mg_xTe$, które są przedmiotem badań doktorantki, są bardzo intensywnie badane na całym świecie. Wyniki otrzymane przez doktorantkę mogą okazać się bardzo przydatne zarówno w przyszłych badaniach podstawowych jak i w aplikacyjnych.

Stwierdzam, że zgodnie z § 21 pkt 2–4 Załącznika nr 1 do uchwały nr 157 Senatu Uniwersytetu Warszawskiego z dnia 29 czerwca 2022 r. w sprawie określenia sposobu postępowania w sprawie nadania stopnia doktora oraz stopnia doktora habilitowanego na Uniwersytecie Warszawskim rozprawa doktorska mgr Aleksandry Łopion zatytułowana: „Rezonanse paramagnetyczne i relaksacja spinowa jonów magnetycznych w obecności gazu nośników w studniach kwantowych” spełnia wymagane warunki a w szczególności:

1. Rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.
2. Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego albo oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej.

Moja ocena pracy jest pozytywna (nawet bardzo pozytywna).

Ponadto, oceniając bardzo wysoko zawarte w rozprawie osiągnięcia naukowe mgr Aleksandry Łopion, a także jej wysokie umiejętności w planowaniu i przeprowadzaniu eksperymentów oraz konstrukcji zaawansowanych układów pomiarowych jak również dogłębnej analizie danych eksperymentalnych i umiejętności wykonywania zaawansowanych obliczeń numerycznych wnoszę o wyróżnienie przedstawionej mi do oceny rozprawy zatytułowanej: „Rezonanse paramagnetyczne i relaksacja spinowa jonów magnetycznych w obecności gazu nośników w studniach kwantowych”. Uzasadnienie wyróżnienia jest częściowo opisane w tekście powyżej. Za najważniejszy wyniki pracy zasługujący na wyróżnienie uważam opracowanie metody wykorzystania jonów magnetycznych do badania lokalnych naprężeń w nanostrukturach półprzewodnikowych z modulacją domieszkowania wzdłuż osi wzrostu oraz wykorzystanie badań optycznie wykrywanego rezonansu magnetycznego do badań oddziaływań jonów magnetycznych z gazem nośników w studni kwantowej. O wybitnych osiągnięciach doktorantki świadczy też fakt, że wyniki swoich badań opublikowała w dwóch artykułach w Physical Review B w 2022 r. (w jednym jest pierwszym autorem a w drugim trzecim) i jednym w Journal of Electronic Materials w 2020 r., w którym jest pierwszym autorem.

Łukasz Bryjko