



dr hab. inż. Paweł Podemski, prof. PWr
Katedra Fizyki Doświadczalnej
Wydział Podstawowych Problemów Techniki
Politechnika Wrocławska
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

Wrocław, 14 lipca 2023 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Karoliny Polczyńskiej zatytułowanej
Wytwarzanie, identyfikacja i kontrola stanu ładunkowego epitaksjalnych kropek
kwantowych z pojedynczymi domieszkami magnetycznymi V, Ni oraz Fe

Przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska powstała na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego pod opieką dr. hab. Wojciecha Pacuskiego, prof. UW. W pracy opisane są badania systemów solotronicznych – kropek kwantowych grup II-VI zawierających pojedyncze domieszki magnetyczne, które obejmują wytworzenie nanostruktur, ich optyczną charakterystykę oraz symulacje numeryczne. Półprzewodniki magnetyczne badane są od ponad 50 lat, jednak zaprezentowane w rozprawie wyniki dotyczą nowych układów solotronicznych o potencjale aplikacyjnym w informatyce kwantowej, która jest aktualną tematyką o istotnym znaczeniu nie tylko w specjalistycznych zastosowaniach, ale również dla całego społeczeństwa.

Praca napisana jest w języku polskim na 113 stronach z uwzględnieniem listy badanych struktur, dorobku naukowego Autorki oraz bibliografii. Tekst rozprawy podzielony jest na 9 rozdziałów. W rozdziale pierwszym przedstawione jest tło historyczne elektroniki półprzewodnikowej i krótkie podsumowanie zawartości dalszych rozdziałów. Zabrakło jednak jasnego zdefiniowania celów pracy, które stanowiłyby oś fabuły dalszych rozdziałów i wyjaśniałyby zasadność kolejnych badań.

Rozdział 2 opisuje domieszki magnetyczne w półprzewodnikach i strukturach niskowymiarowych. Bardzo dobrze nakreślone jest tło historyczne dotychczasowych badań – od półprzewodników półmagnetycznych, przez kropki kwantowe, aż do układów solotronicznych, łączących dwa wcześniejsze zagadnienia. Trochę nienaturalne jest opisywanie kropek kwantowych w czasie przeszłym (rozdział 2.2), co sugeruje, że tego rodzaju struktury były wprawdzie badane w dawnych czasach, ale dzisiaj stanowią jedynie ciekawostkę historyczną, a przecież właściwości kropek kwantowych wciąż są intensywnie studiowane, czego dowodem jest, między innymi, recenzowana praca. Podobna zmiana czasu narracji w odniesieniu do kropek kwantowych pojawia się również w rozdziale 4.1, gdzie na stronie 20 jeden z akapitów zaczyna się słowami „Istniały jednak struktury (...)”.

W Rozdziale 3 przedstawione są urządzenia wykorzystane podczas wzrostu nanostruktur oraz w późniejszych badaniach optycznych. Szczegółowo opisana jest komora do wzrostu metodą epitaksji z wiązek molekularnych wraz z wykorzystanymi systemami monitorowania procesu wzrostu *in situ*. Omówiony jest układ do pomiaru mikrofotoluminescencji, pozwalający na obserwację emisji z pojedynczych kropek kwantowych. Zabrakło jednak informacji o rozdzielczości spektralnej układu oraz wytłumaczenia jakie było przeznaczenie filtrów przedstawionych na rysunku 3.2.



Przedstawiony jest również układ do pomiarów magnetospektroskopowych z rozdzielczością polaryzacyjną, który pozwalał na potwierdzenie obecności jonu metalu przejściowego w pojedynczej kropce kwantowej. Wymieniony jest tutaj wykonany na zamówienie immersyjny mikroskopowy obiektyw odbiciowy – przydatne byłoby informacje o jego aperturze numerycznej oraz powiększeniu. W części poświęconej rozdzielczości polaryzacyjnej nie do końca jest jasne co oznacza „anizotropia kropki kwantowej”, która jest charakteryzowana za pomocą kąтового rozkładu polaryzacji liniowej. Czy jest to asymetria kształtu kropki kwantowej w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku wzrostu? Czy może asymetria potencjału wiążącego nośniki w kropce (w tej samej płaszczyźnie)? Ponieważ obie asymetrie nie zawsze są tożsame, a „anizotropia kropki kwantowej” może mieć jeszcze inne znaczenia, należałoby uściślić intencję Autorki, zwłaszcza że hasło to pojawia się jeszcze wielokrotnie w tekście rozprawy.

Rozdział 4 prezentuje proces wytwarzania kropek kwantowych CdTe, które są przedmiotem badań w kolejnych częściach pracy. Omówiony jest szczegółowo i przekonująco etap wyboru układu materiałowego, z dyskusją takich parametrów jak stałe sieci, symetria kryształu i przerwa energetyczna. Odrobinę enigmatyczna jest nazwa programu „Mercury 3.8”, który został wykorzystany do wygenerowania schematów sieci krystalicznych, przedstawionych na rysunku 4.2. Przydałaby się krótka informacja o tym programie lub co najmniej odnośnik pozwalający na uzyskanie jej w zewnętrznych źródłach. W dalszej części rozdziału 4 omówiony jest wzrost warstw buforowych CdTe oraz ZnTe. Na pochwałę zasługuje bardzo duża przejrzystość opisu i przystępny język, pozwalający na zrozumienie procesu wzrostu również niespecjalistom. Nie do końca wytłumaczone jest, dlaczego Autorka spodziewa się powstania interferencji związanych z warstwą buforową ZnTe i w jakim widmie miałyby one być obecne – odbicia, fotoluminescencji? I co powoduje, że ryzyko obserwacji interferencji jest mniejsze przy zastosowaniu warstwy buforowej CdTe? Na stronie 25 pojawia się informacja, że z odległości linii na rysunkach 4.5a oraz 4.5c można było wyznaczyć stałe sieci GaAs oraz CdTe. Czy zostały one wyznaczone? A jeżeli tak, to czy zgadzały się z wartościami literaturowymi? Po części poświęconej wzrostowi warstw buforowych, Autorka opisuje wyznaczanie prędkości wzrostu za pomocą pomiaru odbicia *in situ*. Ponownie, objaśnienie metody jest szczegółowe, jednak przydatne byłoby wyjaśnienie pochodzenia sinusoidalnej zależności współczynnika odbicia od czasu, przedstawionej na rysunku 4.6. Nie jest również oczywiste w jaki sposób określony został upływ czasu, jeżeli przed wykonaniem pomiaru konieczne było zatrzymywanie obrotów podłoża. Rozdział 4 zakończony jest omówieniem ogólnego schematu procesu wzrostu kropek kwantowych CdTe.

Rozdział 5 poświęcony jest optycznej charakteryzacji kropek kwantowych CdTe, co stanowi punkt odniesienia dla dalszych części pracy, gdzie omawiany jest wpływ pojedynczych jonów wanadu oraz niklu na widma optyczne kropek kwantowych CdTe. Przedstawiona jest zarówno emisja z zespołu kropek kwantowych, jak i rekombinacja promienista poszczególnych kompleksów ekscytonowych w pojedynczej kropce kwantowej. Autorka omawia budowę poszczególnych kompleksów ekscytonowych i możliwości ich obserwacji w widmach mikrofotoluminescencji dla różnych polaryzacji liniowych detekcji. Na stronie 34 jako miejsce kreacji nośników podczas pomiaru fotoluminescencji wskazane są stany wzbudzone, jednak przy pobudzaniu wiązką laserową o długości fali 532 nm, absorpcja powinna zachodzić przede wszystkim w materiale objętościowym – na przykład w warstwie buforowej CdTe. Stronę dalej, na rysunku 5.2a, przedstawiona jest identyfikacja



HR EXCELLENCE IN RESEARCH



Politechnika Wrocławska

Wydział Podstawowych Problemów Techniki

Katedra Fizyki Doświadczalnej

Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

T: +48 71 320 25 79

wppt.kid@pwr.edu.pl
www.pwr.edu.pl

REGON: 000001614

NIP: 896-000-58-51

Bank Zachodni WBK S.A.

37 1090 2402 0000 0006 1000 0434



kompleksów ekscytonowych w pojedynczej kropce kwantowej CdTe. W jaki sposób dokonano rozróżnienia między linią emisyjną oznaczoną jako ekscyton, a linią bieksytonową? Dla obu linii widoczne jest rozszczepienie struktury subtelnej, ale nie został przeprowadzony pomiar w funkcji mocy pobudzania, który z pomocą równań kinetycznych mógłby na taką identyfikację pozwolić.

W dalszej części Autorka przedstawia zachowanie kropki kwantowej CdTe w polu magnetycznym. Pomiar został wykonany w zakresie od -10 do 10 T w konfiguracji Faradaya. Ponieważ badana kropka kwantowa nie zawierała domieszek, otrzymane widmo było punktem odniesienia podczas identyfikacji kropek kwantowych z domieszkami magnetycznymi w kolejnych rozdziałach. Jedną z charakterystycznych cech niedomieszkowanej kropki kwantowej była obecność *anticrossingów* jedynie w zerowym polu magnetycznym. Opis jest przejrzysty i zrozumiały, ale zabrakło wyjaśnienia, dlaczego detekcja prowadzona jest w polaryzacji kołowej. Ostatnia część rozdziału 5 poświęcona jest opisowi teoretycznemu ekscytonu w kropce kwantowej, który ma prowadzić do otrzymania symulacji zależnego od pola magnetycznego widma mikrofotoluminescencji. Przedstawiony jest hamiltonian ekscytonu (zabrakło wyjaśnienia czym jest γ) oraz opisane jest jak z wartości własnych powstała mapa ukazująca zależność emisji od pola magnetycznego (rysunek 5.5), która bardzo dobrze zgadza się z analogiczną zależnością otrzymaną eksperymentalnie. Brakuje jednak informacji w jaki sposób z hamiltonianu otrzymano wartości własne. W jaki sposób dokonano jego diagonalizacji? Co oznacza sformułowanie „po zastosowaniu reguł wyboru”? Jest to o tyle istotne, że podobne obliczenia przeprowadzane są również w dalszej części pracy i na ich podstawie formułowane są wnioski. Autorka nie tłumaczy również, dlaczego do otrzymania zgodności z eksperymentem konieczne było zastosowanie w symulacjach poszerzenia linii emisyjnych odpowiadających temperaturze 30 K, podczas gdy temperatura pomiaru wynosiła 1,7 K.

Rozdział 6 jest pierwszym z trzech prezentujących wpływ domieszek magnetycznych na widma emisyjne kropek kwantowych. Każdy z tych rozdziałów rozpoczyna się bardzo ciekawym wprowadzeniem, przedstawiającym historię omawianego pierwiastka. W rozdziale 6 badana jest pojedyncza domieszka wanadu w kropce kwantowej CdTe. Po omówieniu struktury energetycznej jonu wanadu wbudowanego w kryształ CdTe, przedstawiony jest sposób wytworzenia kropek kwantowych CdTe, które docelowo mają zawierać pojedynczy jon wanadu. Poszczególne etapy wzrostu monitorowane były za pomocą pomiaru dyfrakcji wysokoenergetycznych elektronów (RHEED). Wytworzone zostały cztery struktury z kropkami kwantowymi CdTe o różnym stopniu domieszkowania wanadem. Do dalszych badań wybrana została struktura z najniższą koncentracją domieszki, która charakteryzowała się najsilniejszą emisją, sugerującą najlepszą jakość struktury krystalicznej. Widma emisyjne zostały zaprezentowane na rysunku 6.3a, jednak zabrakło informacji o gęstości mocy pobudzania, a co najmniej potwierdzenia, że była ona jednakowa dla wszystkich badanych struktur o różnej koncentracji domieszki, co pozwalałoby na wnioskowanie o względnej jakości struktur na podstawie intensywności emisji. Przydatny byłby również komentarz, czym mogło być spowodowane przesunięcie ku czerwieni widma emisji z kropek kwantowych CdTe dla struktury UW1826 względem struktury UW1829 – oba przedstawione na rysunku 6.3a. Dodatkowo, na widmie pochodzącym ze struktury UW1827 widoczna jest słaba emisja w obszarze spektralnym kropek kwantowych, jednak uznano ją za niepochodzącą z kropek – dlaczego?



HR EXCELLENCE IN RESEARCH



Politechnika Wrocławska

Wydział Podstawowych Problemów Techniki

Katedra Fizyki Doświadczalnej

Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

T: +48 71 320 25 79

wppt.kfd@pwr.edu.pl
www.pwr.edu.pl

REGON: 000001614

NIP: 896-000-58-51

Bank Zachodni WBK S.A.

37 1090 2402 0000 0006 1000 0434



W dalszej części rozdziału 6 omówione jest wykorzystanie pola magnetycznego do identyfikacji kropek kwantowych CdTe z pojedynczą domieszką jonu wanadu. Wpływ domieszki był widoczny jako podwojenie linii emisyjnych pochodzących od kompleksów ekscytonowych związanych w kropce. Dodatkowo, dla niezerowych pól magnetycznych, Autorka obserwowała obecność *anticrossingów*, a zmiana polaryzacji liniowej detekcji nie miała większego wpływu na obserwowane widmo emisji. Sposób wykrywania obecności jonów domieszki w kropkach kwantowych jest bardzo jasno opisany. Następnie Autorka podjęła się próby wytłumaczenia obserwowanego wpływu domieszki na przykładzie neutralnego ekscytynu w kropce kwantowej.

Pierwsza hipoteza wykorzystywała zmianę wartości rozszczepienia w miejscach występowania *anticrossingów* dla różnych wartości pola magnetycznego. Została wyznaczona liniowa zależność rozszczepienia od indukcji magnetycznej, która była jednym z parametrów występujących w hamiltonianie opisującym kropkę kwantową zawierającą jon wanadu. Zaproponowany model został przedstawiony trochę zbyt pobieżnie (na przykład geneza hamiltonianu (6.1)) oraz nie zostało wytłumaczone w jaki sposób przy otrzymywaniu symulowanego widma uwzględniono hamiltonian pustej kropki kwantowej (6.3). Ostatecznie, zasymulowane widmo pokazało bardzo dobrą zgodność z danymi otrzymanymi eksperymentalnie, jednak ze względu na nieznaną fizyczną interpretację liniowej zależności rozszczepienia od indukcji magnetycznej, hipoteza pierwsza została uznana za niezadowalającą.

Hipoteza druga bazowała na efekcie mieszania stanów w paśmie walencyjnym na skutek obecności naprężeń. Zaproponowana została poprawka do hamiltonianu opisującego stan układu kropki kwantowej z jonem magnetycznym, która uwzględniała wpływ naprężenia ścinającego na mieszanie stanów dziurowych. Ponownie, wykonane symulacje bardzo dobrze odtworzyły dane eksperymentalne. Ta hipoteza została wybrana jako prawdziwa – tłumaczyła zarówno pochodzenie *anticrossingów*, jak i brak rozszczepienia w zerowym polu magnetycznym. Nie został jednak skomentowany mechanizm prowadzący do zwielokrotnienia linii emisyjnych, pochodzących od rekombinacji promienistej kompleksów ekscytonowych związanych w kropce kwantowej, który spowodowany był obecnością jonu wanadu. Nie jest również jasne, skąd wiadomo, że w kropce kwantowej CdTe znajdował się tylko jeden jon wanadu. Jak można by odróżnić obecność jednego jonu domieszki od ich większej ilości? Czy może wbudowanie większej liczby jonów wanadu w kropkę kwantową nie było możliwe? Jeżeli tak, to dlaczego?

Ostatnia część rozdziału 6 poświęcona jest fluktuacjom ładunku jonu wanadu. Autorka zaobserwowała zwielokrotnienie linii emisyjnych – efekt ten został przypisany obecności jonu wanadu w sąsiedztwie kropki kwantowej CdTe i fluktuacjom jego stanu ładunkowego. Podczas długotrwałego pobudzania wiązką laserową nastąpiła redukcja liczby obserwowanych linii emisyjnych, co zostało zinterpretowane jako stabilizacja stanu ładunkowego jonu wanadu znajdującego się w sąsiedztwie kropki kwantowej. Przydatny byłby komentarz, dlaczego stabilizacja ładunku jonu wanadu zaszła dopiero po ponad godzinie pobudzania wiązką laserową i czy efekt ten był odwracalny? I czy można wykluczyć wpływ na kropkę fluktuacji ładunku w pobliżu kropki kwantowej, który nie byłby związany z obecnością jonu wanadu?

W rozdziale 7 kontynuowane są badania struktur z kropkami kwantowymi CdTe, które tym razem domieszkowane są jonami niklu. Podobnie jak w rozdziale 6 najpierw przedstawiona jest krótka historia niklu, opis jego struktury energetycznej oraz sposób



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Evaluated by
IEP INSTITUTIONAL
EVALUATION
PROGRAMME
www.iep-qaa.org

Politechnika Wrocławska

Wydział Podstawowych Problemów
Techniki

Katedra Fizyki Doświadczalnej

Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

T: +48 71 320 25 79

wppt.kfd@pwr.edu.pl
www.pwr.edu.pl

REGION: 000001614
NIP: 896-000-58-51
Bank Zachodni WBK S.A.
37 1090 2402 0000 0006 1000 0434



wytwarzania struktur o różnej koncentracji domieszki niklu. Podczas omawiania wzrostu kropek kwantowych, zaprezentowane jest widmo odbicia (rysunek 7.3), jednak jego interpretacja jest niejasna. Jakie dokładnie informacje wynikały z obserwowanych interferencji? Do dalszych badań została wybrana struktura o jednej z wyższych koncentracji domieszki niklu, co było kompromisem pomiędzy wysokim stopniem domieszkowania, zwiększającym szanse wbudowania jonu niklu w kropkę kwantową, a intensywnością emisji, która malała wraz ze stopniem domieszkowania, na skutek pogarszającej się jakości krystalicznej materiału.

W przypadku jonu niklu, jego obecność w kropce kwantowej CdTe manifestowała się zwielokrotnioną linią emisyjną trionu dodatniego, dla którego w niezerowym polu magnetycznym obserwowane były wielokrotne *anticrossingi*. Ze względu na bogatą strukturę linii trionu dodatniego, przy jednoczesnej dużej intensywności tego kompleksu, pomiary mikrofotoluminescencji były wykonywane na potrójnym monochromatorze. Tutaj przydatna byłaby informacja o rozdzielczości spektralnej wykorzystanego układu – to znaczy nieco bardziej precyzyjna niż podana w pracy „największa dostępna rozdzielczość”. Szczególnie brakuje tej informacji przy omawianiu rysunku 7.7, który zatytułowany jest „Znaczenie wysokiej rozdzielczości (...)” i porównuje widma trionu dodatniego otrzymane z pomiarów z różną (ale nieznaną!) rozdzielczością spektralną. Podczas badań z dużą mocą pobudzania, zaobserwowana została jakościowa i trwała zmiana widma emisji, co zostało opisane jako zmiana stanu ładunkowego jonu. Ilustracją tego efektu powinien być rysunek 7.8, jednak zabrakło informacji, czym różnią się obie jego części. Jeżeli gęstościami mocy pobudzania, to ile one wynosiły? Ciekawa byłaby próba głębszej interpretacji tego procesu, który był trwałą modyfikacją, po której emisja z kropki kwantowej przypominała widmo kropki niezawierającej domieszki magnetycznej. Dla atomów niklu zaobserwowane zostało, podobnie jak wcześniej dla wanadu, wbudowywanie jonów w otoczeniu kropki kwantowej z widocznymi fluktuacjami ładunku w postaci zwielokrotnienia linii emisyjnych.

Ostatnia część rozdziału 7 przedstawia próbę kontroli stanu ładunkowego kropki kwantowej CdTe. Autorka opisuje sposób wykonania kontaktów elektrycznych z górną elektrodą wykonaną z cienkiej warstwy niklu, umożliwiającą dostęp optyczny do struktury przy jednoczesnej możliwości przyłożenia napięcia. Pierwszy pomiar emisji w funkcji przyłożonego napięcia został wykonany dla niedomieszkowanej kropki kwantowej CdTe. Modyfikacja napięcia w zakresie od -13 do 13 V pozwoliła na obserwację zmiany stanu ładunkowego kropki kwantowej, monitorowanego za pomocą względnej intensywności linii trionu dodatniego i ujemnego. W kolejnym kroku analogiczny eksperyment został wykonany dla kropki kwantowej CdTe z jonem niklu znajdującym się w jej otoczeniu. Otrzymany wynik został zaprezentowany na rysunku 7.18, jednak niezrozumiałe jest, dlaczego reżim ujemny przyjęto poniżej -3 V, jeżeli wciąż najsilniejszą linią był trion dodatni. Najważniejszą obserwacją było zaprezentowanie możliwości stabilizacji ładunku jonu znajdującego się w otoczeniu kropki kwantowej poprzez przyłożenie odpowiednio wysokiego napięcia, co było widoczne jako redukcja liczby linii emisyjnych. Efektem ubocznym był wzrost poszerzenia linii, jednak w rozprawie nie jest podane do jakich wartości.

W rozdziale 8 przedstawione są wyniki badań znanych już wcześniej kropek kwantowych CdSe z domieszką jonu żelaza. Autorka postanowiła wykorzystać opracowaną przez siebie metodę wykonywania kontaktów do kontroli stanu ładunkowego również tych nanostruktur. Po przedstawieniu dotychczasowych badań kropek kwantowych CdSe



HR EXCELLENCE IN RESEARCH



Politechnika Wrocławska

Wydział Podstawowych Problemów Techniki

Katedra Fizyki Doświadczalnej

Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

T: +48 71 320 25 79

wppt.kfd@pwr.edu.pl
www.pwr.edu.pl

REGON: 000001614

NIP: 896-000-58-51

Bank Zachodni WBK S.A.

37 1090 2402 0000 0006 1000 0434



z domieszką żelaza i omówieniu struktury energetycznej jonu żelaza, opisane jest wytwarzanie kontaktów elektrycznych metodą zaprezentowaną wcześniej w rozdziale 7. Badane w tym rozdziale kropki kwantowe jako jedyne nie zostały wzrośnięte przez Autorkę pracy, co jest jednak wyraźnie zaznaczone w tekście rozprawy. Za pomocą osadzania warstwy niklu, wykonane zostały górne elektrody o różnej grubości. Na podstawie widm fotoluminescencji do dalszych badań wybrana została struktura z najcieńszą (3 nm) warstwą niklu, jednak tak niefortunnie się składa, że jest to jedyna struktura, dla której widmo emisji nie zostało zamieszczone na rysunku 8.3e, charakteryzującym wpływ warstwy niklu na możliwość obserwacji emisji. Jest to zapewne przeoczenie, ale brakujące widmo było głównym czynnikiem wyboru struktury do dalszych prac.

Po znalezieniu kropki kwantowej CdSe zawierającej jon żelaza, wykonany został pomiar w funkcji przyłożonego napięcia w zakresie od -20 do 20 V. Pozwoliło to na obserwację, podobnie jak w przypadku kropek kwantowych CdTe, zmiany stanu ładunkowego kropki z dodatniego na ujemny, w którym pojawiały się dodatkowo nowe linie emisyjne. W celu ich identyfikacji przeprowadzone zostały dodatkowe badania w funkcji pola magnetycznego z rozdzielczością polaryzacyjną dla zerowego napięcia (reżim dodatni) oraz napięcia -15 V (reżim ujemny). W dalszej części Autorka omawia strukturę nazwaną „X”, widoczną na widmach emisji w funkcji pola magnetycznego jako przecinanie się linii kompleksów ekscytonowych. Wskazany jest związek rodzaju kompleksu ekscytonowego z polaryzacją kołową, dla której obserwowana jest struktura „X”. Jest on szczegółowo przedstawiony w tabeli 8.1, jednak dyskusja na stronie 96, tłumacząca powstanie tej tabeli i następnie identyfikację dodatkowych linii jako podwójnie ujemnie naładowany ekscyton oraz ujemnie naładowany bieksyton, nie jest do końca jasna. Dodatkowo, nie ma informacji, czy widmo na rysunku 8.6 jest zmierzone dla wybranej polaryzacji kołowej, czy też nie jest rozdzielone polaryzacyjnie.

Ostatnia część rozdziału 8 przedstawia wykorzystanie istniejącego już modelu pojedynczej kropki kwantowej CdSe zawierającej jon żelaza do opisu ekscytonu w badanym układzie. Wynik obliczeń bardzo dobrze odwzorował dane uzyskane eksperymentalnie. Zabrakło jedynie informacji dla jakiej wartości napięcia zaprezentowane jest porównanie symulacji numerycznych z wynikiem eksperymentalnym (rysunek 8.7), ale prawdopodobnie przy braku przyłożonego napięcia, gdy linia ekscytonowa jest bardziej intensywna. Przydatny byłoby odwołanie się do pozycji literaturowych przy stwierdzeniu, że wartości parametrów uzyskanych z obliczeń numerycznych są typowe dla kropek kwantowych CdSe zawierających pojedynczy jon żelaza (str. 97 i 98).

Rozprawa zakończona jest podsumowaniem zawartym w rozdziale 9, w którym zostały również nakreślone możliwości dalszych badań, pokazujące, że tematyka zaprezentowana w pracy jest wciąż aktywnie rozwijana.

Układ pracy jest przemyślany, logiczny i stopniowo wprowadza w kolejne zagadnienia. Również cytowane źródła są dobrze dobrane i zawierają zarówno pozycje historyczne, jak i bieżące prace naukowe. Na dużą pochwałę zasługuje przystępny, a jednocześnie staranny język, którym napisany jest tekst rozprawy, co powodowało, że pracę czytało się z przyjemnością. Dzięki temu będzie stanowić ona cenną pozycję dydaktyczną dla doktorantów i studentów starszych lat, rozpoczynających przygodę naukową z nanostrukturami II-VI. Również sam układ tekstu i wykonanie rysunków są na wysokim poziomie estetycznym. Jak w każdym dłuższym tekście nie udało się uniknąć drobnych błędów, takich jak odwołanie do tabeli 7.2 zamiast 7.1 na stronie 64, o rząd za



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Evaluated by
IEP INSTITUTIONAL
EVALUATION
PROGRAMME
www.iep-gaa.org

Politechnika Wrocławska

Wydział Podstawowych Problemów
Techniki

Katedra Fizyki Doświadczalnej

Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

T: +48 71 320 25 79

wppt.kfd@pwr.edu.pl
www.pwr.edu.pl

REGON: 000001614

NIP: 896-000-58-51

Bank Zachodni WBK S.A.

37 1090 2402 0000 0006 1000 0434



duża wartość współczynnika kierunkowego na rysunku 6.6, problem z kolorami okręgów w podpisie tego samego rysunku, brak wyjaśnienia czym jest ξ w równaniu (6.6), czy brak jednostek temperatury i odstępów między wartością a jednostką w tabeli 9.1. Przydatne byłoby również numerowanie wszystkich równań, a nie tylko wybranych oraz ujednolicenie oznaczeń jednostek względnych stosowanych na wykresach. Większość wykonanych badań opisana jest bardzo szczegółowo, jednak są miejsca, gdzie opis był zdecydowanie zbyt powierzchowny, co zostało zaznaczone wyżej przy opisie poszczególnych rozdziałów.

Rozprawa doktorska Pani mgr Karoliny Połczyńskiej prezentuje oryginalne wyniki badań układów solotronicznych złożonych z kropek kwantowych II-VI oraz jonów wanadu, niklu oraz żelaza. Z sukcesem udało się wytworzyć kropki kwantowe zawierające domieszkę magnetyczną wanadu oraz niklu, co zostało potwierdzone w badaniach magnetoptycznych wspartych symulacjami numerycznymi. Zaprezentowana została również kontrola stanu ładunkowego kropek kwantowych CdTe z domieszką niklu w barierze oraz kropek kwantowych CdSe zawierających jon żelaza. Dla kropek kwantowych CdTe pokazany został również sposób stabilizacji fluktuacji ładunku jonu niklu. Przedstawione w rozprawie badania zostały wykonane osobiście przez Autorkę, co zasługuje na szczególne uznanie, gdyż obejmowały zarówno wzrost nanostruktur, wykonanie niebanalnych eksperymentów optycznych, jak i symulacje numeryczne. W prowadzonych dyskusjach widoczne jest rozumienie przez Autorkę opisywanych zjawisk fizycznych i duża intuicja w opisie pobocznych wątków. Materiał przedstawiony w pracy był również prezentowany osobiście przez Autorkę podczas ustnych wystąpień na konferencjach międzynarodowych, takich jak *49th International School and Conference on the Physics of Semiconductors „Jaszowiec 2021”*, *EMRS 2022 Fall Meeting* czy *International Conference on Molecular Beam Epitaxy*.

Wymienione wyżej uwagi nie wpływają negatywnie na dużą wartość merytoryczną rozprawy, która wnosi nowe informacje o nieznanych do tej pory właściwościach układów solotronicznych, które dodatkowo mają pewien potencjał aplikacyjny. Mogę z przekonaniem stwierdzić, że Autorka zaprezentowała w rozprawie cenną umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, przedstawiając jednocześnie rozległą wiedzę teoretyczną z zakresu dyscypliny nauk fizycznych. Zaprezentowane badania i ich wyniki stanowią oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i wnioskuję o dopuszczenie Pani mgr Karoliny Połczyńskiej do dalszych etapów postępowania.

Paweł Podemski



HR EXCELLENCE IN RESEARCH



Politechnika Wrocławska

Wydział Podstawowych Problemów Techniki

Katedra Fizyki Doświadczalnej

Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

T: +48 71 320 25 79

wppt.kfd@pwr.edu.pl
www.pwr.edu.pl

REGON: 000001614

NIP: 896-000-58-51

Bank Zachodni WBK S.A.

37 1090 2402 0000 0006 1000 0434