

Dr hab. Marian Stanisław Uba, prof. UWB
Wydział Matematyki i Informatyki
Uniwersytet w Białymstoku
ul. K. Ciołkowskiego 1M, 15-245 Białystok

Białystok, 31.07.2017r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgra Jakuba Kobaka zatytułowanej:
„Spektroskopowe badania anizotropii kropek kwantowych CdTe z
pojedynczymi jonami kobaltu”**

Recenzowana rozprawa doktorska mgra Jakuba Kobaka poświęcona jest zagadnieniom dotyczącym półprzewodnikowych kropek kwantowych z pojedynczymi jonami metali przejściowych. Tematyka ta zawiera się w szerszym zakresie dynamicznie rozwijającej się solotroniki, czyli optoelektroniki opartej na pojedynczych domieszkach. Dziedzina ta jest szczególnie interesująca ze względu na potencjalne zastosowania w zakresie pamięci komputerowych i komputerów kwantowych, a równocześnie niesie ze sobą bogactwo podstawowych problemów naukowych związanych z optycznym manipulowaniem – odczytem i zapisem stanu kwantowego pojedynczego centrum domieszkowego.

W pracy doktorskiej mgra Jakuba Kobaka zostały postawione dwa cele – 1) wytworzenie i 2) zbadanie metodami optycznymi nowego systemu solotronicznego – półprzewodnikowych kropek kwantowych zawierających pojedynczy jon kobaltu. Nowatorstwo wytworzonego systemu kropek kwantowych CdTe/ZnTe z pojedynczymi jonami Co^{2+} polegało na tym, że dotychczas nie udało się otrzymać półprzewodnikowych kropek kwantowych z jonami metali przejściowych, których energia przejść wewnątrzcentrowych jest niższa, niż energia stanów ekscytonowych i w których luminescencja ekscytonowa nie byłaby wygaszana. W pracy „*Designing quantum dots for solotronics*” z 2014r opublikowanym w prestiżowym czasopiśmie *Nature Communications*, w której mgr Jakub Kobak jest pierwszym autorem, wykazano, że w przypadku kropek kwantowych CdTe/ZnTe z pojedynczymi jonami Co^{2+} nie występuje zjawisko wygaszania luminescencji. Wynik ten otworzył szerokie pole badań związanych z układami kropek kwantowych z pojedynczymi jonami metali przejściowych. Świadczy o tym fakt dużej liczby cytowań po ukazaniu się tej pracy (62 do chwili obecnej wg. Web of Science) i dynamicznego wzrostu liczby takich układów i prac im poświęconych.

Wymieniona powyżej praca należy do zbioru 20, w większości wysoko punktowanych prac o zasięgu międzynarodowym, w których mgr Jakub Kobak jest współautorem, w 6 jest pierwszym, a w 6 drugim autorem. Prace te powstały w większości w grupie badawczej w Instytucie Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Warszawskiego, a część z nich we współpracy z grupami badawczymi z Instytutu Fizyki PAN, a także Laboratorium Wysokich Pól Magnetycznych CNRS w Genoble, Francja oraz Uniwersytetu Bremen w Niemczech. Świadczy to bardzo dobrze o umiejętności współpracy naukowej autora nie tylko ze współpracownikami krajowymi, ale również zagranicznymi. O umiejętności prezentacji wyników badań przez doktoranta świadczy również fakt, że osobiście wygłosił on w latach 2011-2016 9 referatów o zasięgu międzynarodowym, w tym 1 referat zaproszony na konferencji *European Materials Research Society*.

Praca doktorska mgra Jakuba Kobaka, wykonana pod kierownictwem prof. dr hab. Andrzeja Golnika oraz dra Wojciecha Pacuskiego, poświęcona jest szczegółowemu tematowi -

magnetoptycznym badaniom anizotropii systemu, w którym pojedynczy jon kobaltu, Co^{2+} wbudowany jest w półprzewodnikową kropkę kwantową CdTe. Praca obejmuje zarówno problem wpływu anizotropowego oddziaływania elektron-dziura, jak i przede wszystkim dotyczy problemu wpływu niejednorodnego lokalnego naprężenia występującego w kropce kwantowej na strukturę spinową stanu podstawowego samego jonu. Rozprawa doktorska liczy 144 strony, wliczając bogaty spis 156 odnośników. Rozprawa doktorska jest dobrze napisana i zorganizowana i zawiera 9 rozdziałów, z których objętość każdego jest właściwie dobrana, a treść jest w sposób niezbędny i wystarczający przedstawiona.

Recenzent nie chce tu szczegółowo omawiać zawartości poszczególnych rozdziałów i wyników rozprawy. Byłoby to powtórzeniem dyskusji zawartej w pracy doktoranta. Chciałbym natomiast zwięźle omówić zawartość głównych części rozprawy i osiągnięte najważniejsze wyniki.

W rozdziale 1 przedstawiona została motywacja i postawiony cel pracy - wytworzenie tellurkowych kropek kwantowych z pojedynczym jonem kobaltu i zbadanie anizotropii układu ekscyton jon-magnetyczny metodami spektroskopowymi. W rozdziale 2 przedstawione są wyczerpująco stosowane przez autora metody badawcze i układy pomiarowe. W 21 stronicowym rozdziale 3 autor opisuje metody epitaksjalnego wytwarzania próbek, w szczególności techniki pozwalające wytworzyć unikalne próbki z kropkami kwantowymi domieszkowanymi pojedynczymi jonami magnetycznymi. Na szczególne podkreślenie zasługuje pokonanie występujących problemów z uzyskaniem próbek zawierających kropki kwantowe z pojedynczymi jonami kobaltu. Należy zaznaczyć, że wytworzone próbki były bardzo wysokiej jakości, niezbędnej do dalszych badań, czego osiągnięcie wymagało poświęcenia dużych nakładów pracy i czasu. W rozdziale 4 zawarte są wyniki niezbędnych badań właściwości magnetoptycznych selenkowych i tellurkowych kropek kwantowych bez jonów magnetycznych. Na podkreślenie zasługuje przedstawiona argumentacja o zasadności przeprowadzonych przez autora badań, mających na celu systematyczne porównanie własności próbek wytworzonych nie tylko w Instytucie Fizyki UW, ale również wytworzonych w 3 różnych laboratoriach (w sumie zostało przebadanych aż 160 kropek kwantowych). Pozwoliło to autorowi uzyskać bogate informacje statystyczne o rozkładach różnych parametrów kropek kwantowych. W rozdziale 5 przybliżony został bardzo istotny problem wygaszania luminescencji ekscytonowej w półprzewodnikach półmagnetycznych. Należy tu podkreślić osiągnięcie ważnego wyniku poprzez przeprowadzenie pomiarów czasów życia stanów ekscytonowych, które wykazały, że w przypadku kropek kwantowych zawierających pojedyncze jony kobaltu efekt tłumienia nie występuje lub jest bardzo nieefektywny. Warto zwrócić uwagę na to, że badany w rozprawie system z pojedynczymi jonami Co^{2+} o niezerowym momencie magnetycznym zasadniczo różni się od poprzednio badanych kluczową cechą – wysoką wrażliwością jonu kobaltu na lokalne naprężenia występujące w kropce kwantowej. Badaniom anizotropii magnetycznej, rozszczepienia stanów spinowych Co^{2+} bez pola i w polu magnetycznym poświęcona jest główna część rozprawy zawarta w rozdziałach 6 i 7 łącznie na 48 stronach. W rozdziale 6 zaprezentowane i wyjaśnione zostało widmo luminescencji głównych linii neutralnego ekscytonu w kropce kwantowej z pojedynczym jonem Co^{2+} , a w rozdziale 7 - dodatkowych słabych linii wynikających z mieszania się stanów spinowych jonu Co^{2+} . Pozwoliło to na wyznaczenie składowych lokalnego naprężenia w kropce kwantowej w kierunku jej wzrostu i w kierunku prostopadłym, ich stosunku w rozdziale 6, a przede wszystkim wartości bezwzględnych w rozdziale 7. Należy podkreślić opracowanie przez autora zarówno uproszczonego jak i pełnego modelu teoretycznego pozwalającego na kompletną interpretację bardzo złożonych i często bardzo trudno mierzalnych linii widmowych w silnych polach magnetycznych i niskich temperaturach. Na uznanie zasługuje nie tylko rozbudowana

dyskusja uzyskanych wyników, ale również obszerna analiza interesujących kierunków rozwoju solotronicznych systemów opartych na kropach kwantowych z pojedynczymi domieszkami jonów metali przejściowych pod względem potencjalnych możliwości koherentnej manipulacji spinem jonu. Rozprawę kończy bogaty spis literatury świadczący nie tylko o wiedzy autora, ale również ułatwiający działania jego następcom.

Rozprawa doktorska napisana jest jasno, zrozumiale i w większości bardzo dobrą polszczyzną. Rozprawa zawiera bardzo małą liczbę potknięć językowych bądź edytorskich, które nie mają znaczenia dla jej zawartości merytorycznej.

W trakcie czytania rozprawy nasunęło się recenzentowi kilka wymagających komentarza uwag i pytań:

-Na str. 53 Autor pisze: „W wyniku działania pola krystalicznego oraz oddziaływania spin-orbita stanem podstawowym jonu Co^{2+} jest stan 4A_2 ”. Fakt, że stan 4A_2 w polu krystalicznym o symetrii T_d jest stanem podstawowym jonu Co^{2+} w żaden sposób nie zależy od wyniku oddziaływania spin-orbita. Natomiast od oddziaływania spin-orbita zależy pośrednio rozszczepienie w zerowym polu (ZFS) stanu 4A_2 pod wpływem naprężeń. Prosiłbym, aby Autor wyjaśnił to dokładniej.

-Na str. 74, w podpisie pod Rys. 6.5 znajduje się zdanie: „Wektory w górnych prawych rogach oznaczają kierunek anizotropii kobaltu” (w podpisie pod Rys. 6.6 i w tekście na str. 73 znajdują się podobne zdania). Połączenie sformułowania „wektorów” z „kierunkiem anizotropii kobaltu” wydaje się być zbyt dużym skrótem myślowym.

- Str. 78, Tabela 6.1. W opisie Tabeli 6.1 i/lub w tekście rozdziału 6.2 nie jest opisane bardziej szczegółowo, w jaki sposób był wyznaczany stosunek parametrów D/E .

-Str. 98. Na Rys. 7.9 zachodzi pomyłka w znaku wartości indukcji pola magnetycznego. W zakresie wartości ujemnych B zgodnie z formułą 7.6 niemożliwe jest wystąpienie minimum funkcji $\Delta_{Co}(B)$ dla wartości parametrów $g_{Co} > 0$ i $D < 0$.

-Str. 98, Rys. 7.9 i str. 104, Tabela 7.1. Wydaje się, z porównania charakteru zależności teoretycznych (formuła 7.6) z zależnościami eksperymentalnymi na Rys. 7.9, że błędy parametrów, a zwłaszcza parametru E , podane w Tabeli 7.1, są zbyt małe. W jaki sposób zostały wyznaczone/oszacowane błędy parametrów w Tabeli 7.1?

-Str. 104, Tabela 7.1. W jaki sposób był wyznaczony parametr E dla próbki w ostatniej linii Tabeli 7.1, jeśli w podpisie i w tekście przed Tabelą 7.1 figuruje informacja, że parametry w tej linii wyznaczone zostały za pomocą uproszczonego modelu? W uproszczonym modelu nie można wyznaczyć parametru E , ponieważ zakłada się, zgodnie z tekstem na str. 102 (linia 6), że parametr E jest równy zeru.

-Str. 115, linia 18. W zdaniu: „Czas relaksacji spinowej izolowanych jonów magnetycznych wzrasta wraz z siłą oddziaływania spin-orbita ...” wkradła się pomyłka. Chodzi oczywiście, jak wynika to zresztą z dalszego tekstu, o szybkość relaksacji. Ewentualnie zdanie powinno brzmieć „Czas relaksacji spinowej izolowanych jonów magnetycznych maleje wraz z siłą oddziaływania spin-orbita ...”.

-Str. 119, linia 3. Autor pisze: „Zaproponowany został także uproszczony model teoretyczny pozwalający wyznaczyć wartości parametrów D , E , g_{Co} i Δ_{Co} ...”. W zestawieniu tym parametr E wystąpił omyłkowo, ponieważ, zgodnie z opisem na str. 102, w uproszczonym modelu zakłada się, że $E=0$.

Podsumowując, stwierdzam mimo wymienionych powyżej drobnych usterek i wątpliwości, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgra Jakuba Kobaka prezentuje wysoki

poziom naukowy. Zawiera ona bogaty i oryginalny materiał doświadczalny, interpretację teoretyczną oraz nowe i ważne wyniki fizyczne, które wnoszą cenny wkład w dziedzinę badań nad kropkami kwantowymi z pojedynczymi jonami magnetycznymi. Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgra Jakuba Kobaka stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną autora w danej dyscyplinie naukowej oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej i spełnia formalne wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez Ustawę z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. Nr 65, poz. 595 z późn. zm.). W związku z tym wnoszę o dopuszczenie mgra Jakuba Kobaka do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Steinistöew 216cc