



dr hab. Michał Zieliński, prof. UMK
Instytut Fizyki
Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej
Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu
ul. Grudziądzka 5/7
87-100 Toruń

Toruń, 24 listopada 2022 r.

Recenzja pracy doktorskiej mgr. Mateusza Krzykowskiego pt. *Dynamika spinów dziurowych w strukturach półprzewodnikowych*

Mgr Mateusz Krzykowski przygotował rozprawę doktorską pod opieką promotora, prof. dr. hab. inż. Pawła Machnikowskiego. Promotorem pomocniczym był dr inż. Michał Gawełczyk. Praca dotyczy teoretycznych badań własności spinowych stanów dziurowych w kropkach kwantowych, w tym także w układach podwójnych kropek kwantowych. Praca koncentruje się na badaniach wspomnianych układów w zewnętrznym polu magnetycznym, ze szczególnym naciskiem na poznanie wpływu procesów fononowych na stany spinowe w pojedynczych kropkach kwantowych InGaAs oraz wpływu morfologii podwójnych kropek kwantowych na ich czynniki żyromagnetyczne (tzw. g -czynniki, ang. g -factors).

Od strony metodologicznej praca bazuje na dobrze ugruntowanej w społeczności metodzie **k.p** (w różnych wariantach) oraz na oprogramowaniu stworzonym przez współpracowników autora, jednakże kandydat do stopnia doktora przygotował także własne skrypty istotnie wspomagające proces obliczeniowy (w tym opublikowane na serwisie *github*). Praca została napisana czytelnym i poprawnym językiem, liczy około 100 stron, została opatrzona wstępem oraz podsumowaniem. Spis literatury zawiera 88 pozycji, w tym liczne odnośniki do najnowszych prac z dziedziny oraz do stron internetowych związanych z oprogramowaniem (bibliotekami) wykorzystywanym przez autora. Pracę uzupełnia wykaz symboli oraz spisy tabel i rysunków.

W skład rozprawy wchodzi 5 rozdziałów. Rozdział 1 jest zwięzły i wprowadza czytelnika w tematykę pracy. Rozdziały 2 i 3 zostały oparte są na artykule w *Physical Review B*, w którym kandydat do stopnia doktora był pierwszym autorem. W rozdziale 2 zwięzłe został omówiony formalizm teoretyczny wykorzystywany w pracy, z kolei rozdział 3 opisuje uzyskane wyniki. Rezultaty te dotyczą w szczególności analizy mechanizmów odwracających spin dziurowego stanu podstawowego, w polu magnetycznym, w tym wkładu od efektu piezoelektrycznego oraz diagonalnych i pozadiagonalnych członów związanych z potencjałami deformacyjnymi (w 4-pasmowym Hamiltonianie **k.p**). Rozdział 4 jest z kolei wg informacji autora pracy oparty o raport powstały na potrzeby *Diamentowego Grantu*. W rozdziale tym systematycznie badane są g -czynniki w układach podwójnych kropek kwantowych InGaAs w funkcji m.in. odległości między kropkami, ich wysokości i promieni obu kropek kwantowych. Badane są także mechanizmy łamiące symetrię układu jak rozsuniecie osi symetrii obu kropek, a także wpływ pola elektrycznego i wydłużenie ich kształtu

na różnych kierunkach krystalicznych. Nie posiadam jednak wiedzy dotyczącej tego czy wyniki zawarte w rozdziale 4 mają szansę na publikację w recenzowanym czasopiśmie naukowym. Rozdział 5 opisuje z kolei wpływ symetrii układu na sprzężenie stanów dziurowych w podwójnych kropkach kwantowych. W szczególności badania te dotyczą sprzężenia stanów spinów w okolicach rezonansów jednocząstkowych (ang. *anti-crossings*) i nieciągłości g-czynnika w zakresie bliskim jego zerowej wartości, zawiązanego z mechanizmami łamania symetrii układu (np. poprzez wydłużenie, rozsuniecie kropek) oraz ewentualnej kompensacji za pomocą pola elektrycznego. Wg mojej wiedzy wyniki z rozdziału 5 nie zostały jeszcze opublikowane w czasopiśmie naukowym.

W mojej opinii praca jest bardzo dobrze napisana i zawiera szereg interesujących wyników dotyczących aktywnej dziedziny badań naukowych. Autor nie ustrzegł się jednak kilku problemów typowych dla rozpraw doktorskich. W rozprawie znalazłem tylko kilka literówek („pozornie mogłoby arbitralna” na stronie 21, „pole elektrycznie” na stronie 56, czy „wraz ze zrostem asymetrii” stronie 75), nie umniejszają one jednak w żaden sposób bardzo dobremu poziomowi edytorskiemu tej pracy.

Być może określenie „interferencja” na stronie 24 nie jest najfortunniejszym sformułowaniem, Podobnie „włączanie” i „wyłączanie” efektów, które zastąpiłbym ich „uwzględnieniem” bądź „pominięciem”. Na niektórych rysunkach (np. 3.2, 3.3, 4.4, 5.1, czy 5.11) brak jest informacji o tym jaki był krok przeprowadzanych obliczeń. Innymi słowy brak jest na tych wykresach punktów przedstawiających wyniki obliczeń, są tylko linie. Należy jednak zauważyć, że na większości wykresów są wyraźnie zaznaczone punkty będące wynikiem obliczeń oraz jest podana klarowna informacja o tym, że linie łączące punkty mają charakter pomocniczy. Na opisie rysunku 3.5 brak jest informacji o tym, który ze stanów jest stanem podstawowym. Choć ta informacja znajduje się w tekście nie jest to oczywiste dla czytelnika. Podobnie dyskusja pod rys. 3.6 sugeruje jedynie zgodność „jakościową”, ale sam rysunek sugeruje (ze względu na skalę logarytmiczną) najwyraźniej zgodność wręcz „ilościową” modelu efektywnego z wynikami metody **k.p.** Na rys. 4.2 (strona 39) nie zauważyłem komentarza dotyczącego konturu drugiej (górnjej) kropki, która nie jest uwzględniona w obliczeniach - może to wprowadzać czytelnika w błąd. W tekście brakuje też satysfakcjonującego uzasadnienia dla dość prostych równań 4.5 i 4.6.

Mam też pewien niedosyt związany z brakiem cytowań oryginalnych prac źródłowych, ewentualnie uznanych podręczników. Przykładowo, na stronie 13 w dyskusji dotyczącej Hamiltonianu Bir-Pikus wskazany byłby odnośnik np. do „*G. L. Bir and G. E. Pikus, Symmetry and Strain-Induced Effects in Semiconductors*”. Podobnie wygląda sprawa z fragmentem na stronie 19 dotyczącym złotej reguły Fermiego. Z innych uwag: nazwa „wykaz publikacji autora opublikowanych w czasie trwania doktoratu” wprowadza czytelnika w błąd z kilku powodów (m.in. dlatego, że praca [4] nie była... opublikowana w czasie trwania doktoratu). Podobnie „Lista prezentacji konferencyjnych” nie wskazuje w żaden sposób czy kandydat prezentował plakaty, czy może były wykłady na konferencjach?

Najważniejsza z moich uwag dotyczący prezentacji wyników związana jest ogromem rezultatów z rozdziału 4. Po dłuższej lekturze wyniki prezentowanych na kilkunastu wykresach, podzielonych dodatkowo na górny i dolny panel (oraz na rezultaty dla dolnej i górnej kropki) zlewają się w całość. Brakuje zatem podsumowania tych wyników np. w formie tabelarycznej. Obrona pracy doktorskiej, będzie moim zdaniem, dobrym miejscem na przedstawienia wniosków płynących z rozdziałów 4 w bardziej syntetycznej, być może tabelarycznej formie.

Z innych problemów, które wymagają odpowiedzi autora chciałbym wskazać na:

- Definicję sprzężenia ze strony 72 (jak i wykresów Rys. 5.3, 5.4 itp.) i sposób jego wyznaczania jest moim zdaniem bardzo mglisty i wymaga klarownego wyjaśnienia, np. w formie grafiki/schematu.
- Jakie są wnioski wynikające z rys. 5.12?
- Nie jest też dla mnie jasne dlaczego na rys.4.4 (a) i (c) brak jest „anti-crossing’ów” w widmie energii (swoją drogą brak jest informacji pod opisem tego rysunku, że obliczenia są prowadzone w polu magnetycznym, choć taka informacja jest w tekście).
- Nie jest dla mnie w pełni jasne jak uzyskano rys 5.13 (mapy gęstości dla lekkich i ciężkich dziur) i co ważniejsze – co z tych map wynika?

Podsumowanie:

Przedstawiona przez mgr. Mateusza Krzykowskiego rozprawa doktorska dotyczy ważnej i aktualnej tematyki badań – fizyki nanostruktur - i jest to rozprawa bardzo wartościowa. Wyniki części badań zawartych w pracy opublikowano w czasopiśmie *Physical Review B*, pozostałe wyniki mają duży potencjał publikacyjny. Wskazane przeze mnie kwestie problematyczne mają charakter drugorzędny i w żadnym stopniu nie zmieniają mojej jednoznacznie pozytywnej opinii na temat pracy. Rozprawa zwraca uwagę swoją jakością naukową, biegłością kandydata w wykonywaniu obliczeń naukowych oraz dużą zdolnością kandydata do interpretacji wyników badań numerycznych.

Z pełnym przekonaniem wnoszę o dopuszczenie Pana mgr. Mateusza Krzykowskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



dr hab. Michał Zieliński, prof. UMK