

Prof. dr hab. Włodzimierz Jaskólski
Instytut Fizyki
Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu

Recenzja pracy doktorskiej mgr. inż. Wojciecha Paska

Własności układów dziurowych w kropkach kwantowych: mieszanie pasm walencyjnych, własności optyczne oraz spinowe

Jako rozprawę doktorską, mgr inż. Wojciech Pasek przedłożył zbiór czterech artykułów opublikowanych w Physical Review B (dwa artykuły z lat 2012 i 2014) oraz w Semiconductor Science and Technology (dwa artykuły opublikowane w 2014 i 2015). Wszystkie publikacje mają kilku autorów: jedynym współautorem pierwszej z nich jest promotor, prof. dr hab. Bartłomiej Szafran, a w trzech pozostałych współautorami są profesor Szafran oraz promotor pomocniczy dr inż. Michał Nowak. Na moją prośbę zgodną z wykładnią Centralnej Komisji ds. Stopni i Tytułów, dokumentacja rozprawy została uzupełniona o oświadczenia współautorów na temat ich wkładu w powstanie wyżej wymienionego cyklu publikacji. Według załączonych oświadczeń wkład promotora w powstanie pierwszej publikacji wynosi 10% a wkład współautorów w powstanie każdej z pozostałych trzech prac wynosi 20%. Wkład ten polegał on m.in. na: *postawieniu problemu, uczestnictwie w wyborze metody numerycznej, uczestnictwie w interpretacji wyników, dyskusji wyników i redakcji tekstów*. Ten wysoki (80% i 90%) poziom zaangażowania doktoranta w powstanie publikacji świadczy o tym, że zostały one wykonane i przygotowane niemalże samodzielnie. Wszystkie artykuły poświęcone są właściwościom optycznym oraz spinowym dziur i kompleksów dziurowych w półprzewodnikowych kropkach kwantowych InGaAs/GaAs i InAs. Wszystkie publikacje są wielostronicowe, poświęcone aktualnym zagadnieniom z zakresu niskowymiarowych struktur półprzewodnikowych, odpowiadają na bieżące problemy eksperymentalne oraz prezentują szereg ciekawych rezultatów otrzymanych drogą bardzo wymagających obliczeń numerycznych przy użyciu nietrywialnych modeli i metod. Spełnione są zatem podstawowe warunki, pozwalające, w zgodzie z Art. 13 Ustawy o Stopniach i Tytule Naukowym, uznać przedstawiony zbiór spójnych tematycznie artykułów za rozprawę doktorską.

Wszystkie artykuły naukowe składające się na rozprawę doktorską zostały opublikowane w bardzo dobrych i dobrych czasopismach specjalistycznych, a przed ukazaniem się zostały zrecenzowane przez fachowców z dziedziny. Ustawa wymaga jednak od recenzenta odpowiedzi na następujące pytania: a) *czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego* i b) *czy wykazuje ona ogólną*

wiedzę teoretyczną kandydata w danej dyscyplinie naukowej. Pierwszy z tych warunków był już w pewnym stopniu weryfikowany podczas recenzji w czasopiśmie, natomiast drugi warunek jest spełniony przy wykazaniu wcześniej wysokim stopniu samodzielności doktoranta w przygotowaniu tych prac. Poniżej, pokrótce scharakteryzuję zawartość merytoryczną i wartość naukową publikacji składających się na rozprawę doktorską.

Pierwsza z prac cyklu poświęcona jest widmom emisji ujemnie naładowanych trionów w układzie dwóch wertykalnie ustawionych, samorosnących kropek kwantowych InGaAs/GaAs o geometrii dysków. Autorzy badają efekty mieszania pasm walencyjnych oraz sprzężenia tunelowego pomiędzy kropkami w funkcji natężenia zewnętrznego pola elektrycznego i odległości między kropkami. Obliczenia wykonane są na bazie czteropasmowego modelu Luttingera-Kohna (KL). Podstawowym celem pracy było sprawdzenie, czy i w jakim stopniu widma emisji trionów zawierają ślady efektu odwracania kolejności wiążącego i anty-wiążącego podstawowego stanu jedno-dziurowego w badanym układzie. Ślady te autorzy odnajdują w odwróceniu intensywności linii rekombinacyjnych w stosunku do modelu z niesprzężonymi pasmami walencyjnymi. Poza tym, autorzy wykazują, że dysocjacja ujemnie naładowanego trionu następuje dwuetapowo, co objawia się charakterystycznym (dla eksperymentu) wzorem „X” pomiędzy energiami rekombinacji trionu do elektronowego stanu podstawowego i do pierwszego stanu wzbudzonego w funkcji natężenia pola elektrycznego. Są to wyniki interesujące, nowe i oryginalne.

W kolejnej publikacji przeprowadzono podobne obliczenia i analizy, ale tym razem dla dodatnio naładowanych trionów. Głównym elementem nowości jest obserwacja pewnych różnic w porównaniu z widmami rekombinacji trionów ujemnych, co jak piszą autorzy, może być bardzo pomocne w procesie identyfikacji doświadczalnych linii widmowych w takich układach.

Trzecia publikacja poświęcona jest problemowi energii wymiany „singlet-tryplet” układu dwóch dziur w podwójnej, wertykalnej kropce kwantowej InGaAs/GaAs o geometrii płaskich dysków. Autorzy pokazują, że mieszanie pasm walencyjnych, uwzględnione poprzez zastosowanie czteropasmowego modelu KL, prowadzi do znikania energii wymiany dla pewnej określonej odległości między kropkami. Badania takie są ważne w kontekście możliwych zastosowań spinowych stopni swobody stanów dziurowych jako *qubitów* w procesie kwantowego przetwarzania informacji. Zaobserwowany efekt zanikania energii wymiany (a co za tym idzie wydłużania czasu koherencji) nie jest nowy, został on przewidziany wcześniej w publikacji [29], w której badano stany układu dwóch dziur w podwójnej kropce germanowo/krzemowej o geometrii piramid. W pracy będącej elementem rozprawy doktorskiej, autorzy próbują interpretować ten fakt nieco inaczej niż to ma miejsce w publikacji [29]. Jednakże nie ulega wątpliwości, że i tym razem jest on śladem efektu odwracania kolejności stanów jedno-dziurowych, wiążącego i antywiążącego, w układzie podwójnej kropki kwantowej. Jednak wyniki i interpretacje zawarte w publikacji [29] mogą być bardziej wiarygodne, gdyż zastosowano tam szerszy model

sześciopasmowy z uwzględnieniem efektów naprężeń, które nie są zaniedbywalne w układach InGaAs/GaAs, a których doktorant nie uwzględnił w swoich badaniach.

Pewne wątpliwości budzą w publikacji nr.3 cytowania prac, w których wcześniej zajmowano się problemem stanów dwu-dziurowych. Na przykład, na końcu ostatniego akapitu sekcji „Introduction” autorzy piszą: *“We demonstrate that, for interdot distances corresponding to the singlet–triplet degeneracy, the exchange energy becomes insensitive to a wide range of electric fields, in contrast to the enhancement of the exchange energy by the electric field that was previously [29] demonstrated for electrons”*, a w końcowej części sekcji 4. „Discussion”: *„In the [29] the authors studied the exchange energy for electrons in the two-dot system...”,* podczas gdy publikacja [29] poświęcona jest wyłącznie stanom dziurowym a nie elektronowym, a problem wpływu pola elektrycznego nie jest tam w ogóle poruszany. Natomiast na początku sekcji 4-tej autorzy piszą: *„The authors of [28] calculated the energy spectra of a pair of strained Ge/Si coupled quantum dots.”*, podczas gdy publikacja [28] poświęcona jest stanom dziurowym w pojedynczej kropce kwantowej GaAs/AlGaAs modelowanej paraboliczno-prostokątnym potencjałem uwięzienia.

Bardzo interesująca jest ostatnia publikacja. Badane są w niej przejścia pomiędzy spinowymi stanami dziurowymi w cylindrycznych kropkach kwantowych InAs wywołane zmiennym polem elektrycznym (tzw. elektryczny dipolowy rezonans spinowy - EDSR) w obecności stałego pola magnetycznego, przy polaryzacji obu pól wzdłuż osi kropek. Autorzy dyskutują dwa reżimy uwięzienia dziur: w kropkach wydłużonych oraz w kropkach płaskich o geometrii dysków. Praca jest odpowiedzią na wyniki eksperymentalne przedstawione niedawno w publikacji [16] z 2013 roku i ma znaczenie w kontekście poszukiwania sposobów manipulacji spinami w kropkach kwantowych za pomocą pola elektrycznego. Podobnie jak w poprzednich pracach cyklu, także i tu autorzy posługują się czteropasmowym modelem dziurowym. W wyniku zaawansowanych obliczeń, w których numerycznie rozwiązują zależne od czasu równanie Schrödingera, obliczają nie tylko prawdopodobieństwa przejść pomiędzy różnymi stanami dziurowymi, ale znajdują także szereg reguł wyboru dla tych przejść a także warunków łamania tych reguł. Jednym z ciekawszych rezultatów tej pracy jest pokazanie, że dla kropek o wydłużonym kształcie, dla których zachodzi silne mieszanie podpasm dziurowych, mogą pojawiać się przejścia odpowiadające wzbudzeniom wielofotonowym (tzw. przejścia ułamkowe).

We wszystkich publikacjach autorzy stosują czteropasmowy model Kohna-Luttingera jako podstawowe przybliżenie do opisu stanów dziurowych z pobliża energetycznego szczytu pasma walencyjnego półprzewodników III-V z prostą przerwą energetyczną. Nasuwa się jednak pytanie jaki wpływ na rezultaty zawarte w rozprawie mogłyby mieć rozszerzenie do modelu sześć a nawet ośmiopasmowego, w szczególności w kontekście ostatniej publikacji poświęconej regułom wyboru dla przejść EDSR. Od końca lat 90. wiadomo bowiem, że w pełni poprawny opis struktury energetycznej nanokryształów InAs w ramach metody *kp* może być otrzymany tylko na gruncie

modelu ośmiopasmowego. Trochę szkoda, że autor nie przeprowadził żadnych prób analizy tego zagadnienia.

Kolejna kwestia to rola efektów naprężeń, których autor nie uwzględnił w swoich obliczeniach, a które mogą być znaczące w układach InAs/GaAs i które mogłyby istotnie zmodyfikować wyniki prezentowane w publikacjach 1-3. Wartość rozprawy z pewnością by wzrosła gdyby została w niej zawarta szersza dyskusja dotycząca możliwego wpływu efektów naprężeń na uzyskane wyniki.

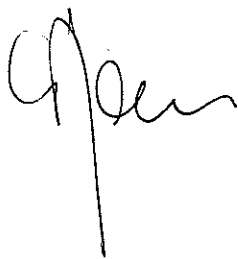
Rodzi się także pytanie o rolę warstw zwilżających, które zostały pominięte w przyjętym w publikacjach 1-3 modelu podwójnej wertykalnej kropki kwantowej.

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Wojciecha Paska poświęcona jest aktualnym problemom fizyki nanostruktur półprzewodnikowych, a zaprezentowane w niej wyniki mają bezpośrednie odniesienie do najnowszych badań eksperymentalnych. W swoich badaniach doktorant uzyskał szereg interesujących rezultatów: Określił wpływ efektów mieszania pasm walencyjnych na strukturę energetyczną oraz widma emisji ujemnie i dodatnio naładowanych trionów w podwójnych, wertykalnych kropkach kwantowych InGaAs/GaAs. W widmach tych kompleksów odnalazł ślady fenomenu powstawania antywiążącego dziurowego stanu podstawowego układu dla pewnych odległości pomiędzy kropkami. Pokazał, że dla określonej konfiguracji kropek kwantowych znika energia wymiany w układzie zawierającym dwie dziury. Zbadał prawdopodobieństwa i określił reguły wyboru dla przejść w paśmie walencyjnym generowanych zmiennym polem elektrycznym; pokazał możliwość występowania tzw. przejść ułamkowych. Z treści publikacji składających się na rozprawę wnioskować można o dużej wiedzy doktoranta w dziedzinie fizyki i spektroskopii ciała stałego a w szczególności niskowymiarowych struktur półprzewodnikowych. Mgr inż. Wojciech Pasek zaprezentował też bardzo dobre opanowanie metod i technik obliczeniowych w tej dziedzinie. Pomimo zawartych wyżej kilku uwag krytycznych, których nie uważam za kluczowe, stwierdzam, że rozprawa spełnia warunki stawiane pracom doktorskim w art.13. Ustawy o Stopniach i Tytule Naukowym i wnoszę o dopuszczenie mgr. inż. Wojciecha Paska do publicznej obrony.

Uwaga dodatkowa.

Praca doktorska mgr. inż. Wojciecha Paska w znacznej części ogniskuje się wokół efektu odwrócenia kolejności wiążącego i antywiążącego stanu dziurowego w podwójnej kropce kwantowej dla odległości między kropkami przekraczających pewną krytyczną wartość. Efekt ten został po raz pierwszy przewidziany przez piszącego tę recenzję w teoretycznych badaniach wykonanych na gruncie atomistycznej metody ciasnego wiązania, opublikowanych w Acta Phys. Pol. w 2004 roku oraz w Phys. Rev. B w 2006r. Został on później potwierdzony doświadczalnie w 2009r. [M.F.Doty et al., Phys. Rev. Lett. 95, 076805]. W 2008 roku Climente et al.

[Phys. Rev. B 78 115323 (2008)] pokazali, że efekt ten widoczny jest także na gruncie metody *kp*. Całkowicie niezrozumiałe jest, dlaczego w publikacjach składających się na rozprawę doktorską (a także w dołączonym do rozprawy przewodniku) cytowana jest wyłącznie ta późniejsza praca, a pomijane są oryginalne publikacje recenzenta z 2004 i 2006r, pomimo faktu, że Climente et al. je cytują. Pomijanie fundamentalnych pozycji dotyczących badanego zjawiska fizycznego wskazuje na brak należytej staranności w prowadzeniu badań naukowych.



TORUŃ,

29-06-2015

