



Instytut Fizyki im. M. Smoluchowskiego
ul. Reymonta 4, 30-059 Kraków

Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej

Dr. hab. Danuta Kruk
Instytut Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego

Recenzja pracy doktorskiej Pani mgr Estery Michaluk Dynamika elektronów w ZnO wyznaczana z badań rezonansu spinowego.

Praca doktorska Pani mgr Estery Michaluk poświęcona jest badaniom własności tlenku cynku przy pomocy Elektronowego Rezonansu Spinowego w celu wyznaczenia wielkości charakteryzujących dynamikę elektronów w tym półprzewodniku, parametrów pola spinowo-orbitalnego oraz częstości pobudzenia elektronów ze stanów donorowych do pasma przewodnictwa.

Rozdział pierwszy pracy jest krótkim wprowadzeniem do zagadnienia, podczas gdy w rozdziale drugim autorka rozprawy zwięźle i przekonująco przedstawia powody podjęcia badań tlenku cynku, dyskutując jego szerokie zastosowania. Dalsza część tego rozdziału zawiera opis struktury pasm elektronowych, oraz własności elektrycznych i krystalicznych ZnO. Opracowanie to jest oparte na solidnym przeglądzie literatury; autorka wypunktowuje szereg istotnych informacji, np. wskazując na kontrowersje w literaturze odnośnie ułożenia pasm walencyjnych.

Rozdział trzeci przedstawia opis teoretyczny zjawiska Elektronowego Rezonansu Spinowego w ujęciu klasycznym i kwantowym. Przedstawiony opis jest bardzo przejrzysty, może on posłużyć nie tylko jako rozdział pracy doktorskiej, wyjaśniający podstawy używanej techniki eksperymentalnej, ale jako bardzo dobry tutorial. Szczególnie podoba mi się w jaki sposób autorka dochodzi do pełnego rozwiązania równań Blocha. Odnośnie tego rozdziału mam też jednak dwie uwagi krytyczne. Pierwsza z nich dotyczy wyjaśnienia pojęcia relaksacji spinowej. Pojęcie to jest bardzo ważne chociażby z tego powodu, że czas relaksacji spin-spin (relaksacji poprzecznej) pojawia się w funkcji Lorentza opisującej kształt linii, wynikający właśnie z rozwiązania równań Blocha; determinuje on szerokość linii. Autorka pisze, że jest to czas „ustalania się równowagi wewnątrz układu spinów”, nie dyskutując żadnych mechanizmów fizycznych. Stwierdzenie autorki jest dosyć enigmatyczne: „na relaksację spin-spin mogą mieć wpływ różnego rodzaju fluktuacje pól lokalnych”; na dodatek kontekst tego wyjaśnienia sugeruje, że jest to mechanizm relaksacji spin-spin ale już nie spin-sieć. Moja druga uwaga dotyczy omówienia możliwych kształtów linii ESR, mianowicie funkcji Lorentza, Gaussa i Dysona. W przypadku dwóch pierwszych funkcji autorka podaje dokładny opis matematyczny, ale dosyć powierzchownie wyjaśnia powody, dla których linia ESR przyjmuje któryś z tych kształtów: „Z rozwiązań równań Blocha wynika, że kształt linii

rezonansu magnetycznego powinien być opisany funkcją Lorentza. W praktyce okazuje się, że w rzeczywistym, paramagnetycznym kryształ na układ spinów elektronowych mogą wpływać różne fluktuacje, które powodują rozrzut ich częstości.” Pola lokalne istnieją zawsze. Istota rozróżnienia pomiędzy obu funkcjami jest taka, że gdy pola lokalne szybko fluktuują w czasie i w konsekwencji się uśredniają, linia ESR przybiera kształt funkcji Lorentza, natomiast w przypadku wolnej dynamiki (nie uśredniających się pól lokalnych) jest to funkcja Gaussa. Trzecia z wprowadzonych funkcji, funkcja Dysona, jest znacznie mniej popularna w ESR z uwagi na jej ścisły związek z problemem przewodnictwa. W tym przypadku autorka przedstawia wyczerpujący opis mechanizmów fizycznych, które prowadzą do takiego kształtu linii, ale nie przedstawia postaci matematycznej tej funkcji, twierdząc, że jest ona skomplikowana.

Kolejne rozdziały pracy są poświęcone wynikom eksperymentalnym ESR dla ZnO i ich analizie. Praca jest zorganizowana w ten sposób, że w momencie gdy dowiadujemy się, że dany efekt został zaobserwowany eksperymentalnie, przedstawione są jego podstawy teoretyczne. Dla przykładu, część rozdziału opisuje zagadnienie pola Rashby. Rozdział ten (a zarazem przegląd wyników eksperymentalnych) rozpoczyna się od opisu zależności tensora g od orientacji (i wyznaczenia jego anizotropii) na podstawie położenia centralnej części linii rezonansowej. Otrzymany wynik jest bliski wartości czynnika g dla swobodnego elektronu, co prowadzi do konkluzji, że w ZnO mamy do czynienia z tzw. płytkami donorami. Ponieważ jednocześnie autorka obserwuje eksperymentalnie anizotropowy przyczynek do szerokości linii, który odzwierciedla fluktuacje lokalnych pól elektrycznych w kryształach, prowadzi nas to do wspomnianej teorii pola Rashby. Autorka pracy jasno i w bardzo przemyślany sposób wyjaśnia związek pomiędzy zwięzieniem linii a polem spinowo-orbitalnym; świadczy to moim zdaniem o głębokim zrozumieniu tego nieprostego zagadnienia. W tym samym rozdziale przedstawiony jest przegląd kształtów linii ESR, otrzymanych dla różnych próbek ZnO w zależności od ich historii termicznej i temperatury.

Różnorodność otrzymanych kształtów linii prowadzi nas w naturalny sposób do dyskusji mechanizmów wywołujących zwięzienie linii rezonansowej, które są obszernie omówione w rozdziale piątym. Rozdział ten jest moim zdaniem kolejnym przykładem doskonałego tutorialu o szerokim zastosowaniu. Dowiadujemy się z niego o fizycznych podstawach różnych mechanizmów zwięzienia linii (tym razem autorka wyraźnie podkreśla, że powodem zwięzienia linii są efekty uśrednienia pól lokalnych, czego zabrakło moim zdaniem w rozdziale trzecim). Mechanizmy zwięzienia linii (sprzężenie wymienne, hopping – tutaj mam drobny problem z terminologią, i aktywacja elektronów donorowych) są dyskutowane w relacji do omawianych wcześniej kształtów linii i opisujących je parametrów. Takie ujęcie problemu uzasadnia konkluzje odnośnie mechanizmów uśredniających w ZnO, przedstawione w dalszej części rozdziału.

Dla silnie wygrzanych próbek ZnO zaobserwowano dwie wąskie linie w widmie ESR. Problemowi temu poświęcony jest rozdział szósty pracy, przypisując poszczególne linie elektronom donorowym i elektronom pasmowym i dyskutując zjawisko Current Induced ESR. O ile użyta w tym rozdziale argumentacja jest dla mnie przekonująca, chciałabym

zwrócić uwagę autorki na dwie „techniczne” sprawy. Skrót CI (current induced) jest rozszyfrowany dopiero pod koniec rozdziału, podczas gdy na jego początku znów omawiane jest, w charakterze wprowadzenia, pole Rashby, który to temat został już obszernie przedstawiony w rozdziale czwartym.

W rozdziałach siódmym i ósmym autorka krótko dyskutuje (jako informacje dodatkowe) współlistnienie faz i relaksację spin-siec; rozdział dziewiąty to zwięzłe podsumowanie najważniejszych wyników pracy.

Praca Pani mgr Estery Michaluk zawiera obszerny materiał eksperymentalny, który został wnikliwie przeanalizowany. Chciałabym tutaj podkreślić, że praca Pani mgr Michaluk wymagała połączenia umiejętności eksperymentalnych i dużej wiedzy teoretycznej. Jest ona napisana bardzo logicznie- w momencie gdy na podstawie wyników eksperymentalnych zadawałam sobie jakieś pytanie – zaraz (na ‘następnej stronie’) dostawałam na nie przekonującą odpowiedź. Praca zawiera szereg starannie wykonanych wykresów i ilustracji oraz duży zbiór referencji, świadczący o znajomości literatury przedmiotu (trochę zastanawia mnie fakt, że Pani mgr Michaluk nie odwołuje się do żadnej ze swoich prac).

Podsumowując, uważam że praca Pani mgr Estery Michaluk spełnia wszystkie wymogi stawiane pracy doktorskiej. Jest to bardzo dobra rozprawa doktorska i wnioskuję o jej wyróżnienie.

Mam kilka drobnych uwag natury językowej. Nieco niezręczne wydają mi się stwierdzenia typu:

„Oczy świata zwróciły się w stronę obniżania wymiarowości wytwarzanych struktur.” (str. 14), „moment paramagnetyczny” (str. 26), „relaksacja spin-siatka” (str. 27), „czas degazacji”(str.28) – po namyśle doszłam do wniosku, że chodziło zapewne o „czas defazacji”, jako tłumaczenie angielskiego „dephasing time”, ale to również brzmi dla mnie niezręcznie, podobnie „zawężenie linii” – sądzę, że w literaturze spotyka się raczej termin „zwężenie linii”. W pracy jest też używany angielski zwrot „hopping” – połączenie „mechanizm hoppingu” nie brzmi moim zdaniem najlepiej.

Pani mgr Michaluk pisze również w rozdziale czwartym (str. 49): „przedstawiono dopasowanie funkcji Dysona przy użyciu programu opracowanego przez pana Jacka Błoniarza-Łuczaka.” Myślę, że właściwe byłoby tutaj podanie nie tylko nazwiska autora oprogramowania, ale również informacji o sposobie działania tego programu.

Danuta Kruk

Danuta Kruk

Bayreuth, 15.09.2010

Danuta Kruk