

## Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr Agnieszki M. Werpachowskiej  
p.t. „*Spin waves and the anomalous Hall effect in ferromagnetic  
(Ga,Mn)As*”

Napisana w języku angielskim rozprawa doktorska liczy 193 stron maszynopisu, a jej bibliografia zawiera 323 pozycji. Jest to opracowanie obszerne, przedstawiające wyczerpująco zagadnienie, któremu jest poświęcone. Uważam nawet, iż do pewnego stopnia można uznać, iż jest to mała „saga” poświęcona wzbudzającemu ostatnio wielkie zainteresowanie spintronicznemu materiałowi, jakim jest arsenek galu domieszkowany manganem (materiał półprzewodnikowy wykazujący własności ferromagnetyczne). Istotnie, w centrum zainteresowania obecnych badań spintronicznych znajdują się rozcieńczone magnetyczne półprzewodniki („*dilute magnetic semiconductors*”), a materiałem wśród nich o szczególnym znaczeniu jest właśnie arsenek galowo-manganowy („*manganese-doped gallium arsenide*”) (Ga,Mn)As, materiał w którym własności półprzewodnikowe czystego arsenku galu („*gallium arsenide*”) zostają - po wprowadzeniu doń domieszek manganowych - wzbogacone o własności magnetyczne, przez co nowy materiał znacznie poszerza swój „spintroniczny potencjał” (ograniczeniem nadal pozostaje jednak temperatura Curie, która nie przekracza 200 K). Autorkę interesują dynamiczne aspekty własności magnetycznych tego materiału wyrażające się głównie poprzez widmo jego wzbudzeń magnetycznych (fal spinowych) determinujących w sposób zasadniczy własności magnetyczne oraz anomalny efekt Halla wiążący dynamikę magnetyzacji z własnościami transportowymi materiału.

Układ treści rozprawy jest następujący: Pierwsze pięć rozdziałów (stanowiących w przybliżeniu 1/3 objętości rozprawy) to wyczerpujące wprowadzenie w aktualny stan wiedzy, zarówno teoretycznej jak i eksperymentalnej, o naturze i podstawowych własnościach elektronowych i magnetycznych rozcieńczonych magnetycznych półprzewodników, ze szczególnym uwzględnieniem arsenku galowo-manganowego (Ga,Mn)As. W Rozdziale 6 Autorka prezentuje opracowany przez siebie algorytm obliczeń numerycznych służący do wyznaczenia struktury pasmowej badanego materiału. W oparciu o ten algorytm Autorka będzie dalej wyznaczała szereg fizycznych – magnetycznych i transportowych – charakterystyk materiału w ramach zaproponowanego przez siebie modelu opierającego się na tzw. efektywnym Hamiltonianie wyprowadzonym w Rozdziale 7. Wśród wyznaczanych charakterystyk (w Rozdziałach: 8, 9 i 10) bardzo istotną rolę odgrywają fale spinowe, którym Autorka poświęca cały (ponad 30-stronicowy) Rozdział 9. (Zainteresowanie falami spinowymi jest tu także usprawiedliwione z powodu oczekiwań związanych z nowym typem materiałów zwanych krysztalami magnonicznymi.) Autorka zajęła się także cienkimi warstwami, pokazując, iż występujące w nich oddziaływania DM (Dzyaloshinskiego-Moriya) mogą prowadzić do

niekolinearnego stanu podstawowego, a w szczególności mogą one być także źródłem jedno-osiowej anizotropii w płaszczyźnie warstwy. Bardzo obiecujące na przyszłość są zainicjowane przez Autorkę w Rozdziale 10 teoretyczne badania anomalnego efektu Halla, który związany jest z ferromagnetyzmem badanego półprzewodnika. Rozprawę zamyka Rozdział 11, w którym Autorka dokonuje w niekonwencjonalny sposób podsumowania swoich wyników umieszczając je natychmiast na szerszym tle badań, które jeszcze powinno się wykonać w przyszłości aby wiedza o tym spintronicznym materiale półprzewodnikowym, jakim jest domieszkowany manganem arsenek galu, była bardziej kompletna.

Należy podkreślić, iż wyniki rozprawy doktorskiej Kandydatki zostały już opublikowane w czasopiśmie o wysokiej randze międzynarodowej w postaci 3 publikacji (oznaczone są one w spisie publikacji numerami [37], [46] i [47]); są to prace współautorskie, dwie – wspólne z Profesorem T. Dietlem – ukazały się one w *Physical Review B* oraz trzecia praca (7 współautorów, Autorka jest na drugim miejscu, Profesor T. Dietel jest także wśród współautorów) ukazała się w *Physical Review Letters*. To piękny dorobek publikacyjny, świadczący także o tym, iż rozprawa dotyczy tematyki, która plasuje się na froncie obecnych badań spintronicznych. Recenzent nie czuje się jednak kompetentny aby omawiać wszystkie aspekty cennych osiągnięć zaprezentowanych w rozprawie. Ograniczę się jedynie do omówienia rezultatów zawartych w newralgicznym Rozdziale 9, poświęconych bliskiej mi tematyce związanej z falami spinowymi.

Rozdział 9 poświęcony jest badaniu fal spinowych zarówno w materiałach masywnych („bulk”), jak i w materiałach cienkowarstwowych. W szczególności wiele miejsca poświęca się w nim wyznaczeniu widma fal spinowych w cienkich warstwach, gdyż jest to sprawa kluczowa dla dogłębnego zrozumienia różnych przejawów dynamiki magnetyzacji ujawniających się w eksperymentach przeprowadzanych na realnych próbkach cienkowarstwowych.. Punktem wyjścia dla tych badań jest sformułowany przez Autorkę w Rozdziale 7 tzw. efektywny Hamiltonian opisujący układ oddziałujących spinów tworzących „rozrzedzoną” sieć zanurzoną w środowisku magnetycznego półprzewodnika; istotną sprawą jest fakt, iż Hamiltonian ten zawiera człon opisujący daleko-zasięgowe oddziaływania wymiany wiążące jony magnetyczne. Hamiltonian ten jest diagonalizowany w przybliżeniu tzw. quasi-nasycenia, najpierw poprzez wyrażenie go poprzez operatory kreacji i anihilacji w przestrzeni prostej, a następnie - w przestrzeni odwrotnej (po zastosowaniu transformacji Fouriera). Następny (ostatni) etap diagonalizacji wymaga dokonania transformacji Bogoliubova, którą Autorka przeprowadza po przyjęciu po drodze kilku upraszczających założeń (są one wymienione na stronach 112-113); wierzę, iż założenia te nie wpływają znacząco na jakość otrzymanych wyników w przypadku rozważania materiału masywnego i można je zaaprobować. Pewne wątpliwości jednak wzbudza we mnie zastosowanie tego samego schematu diagonalizacji wtedy gdy rozważania dotyczą cienkiej warstwy; w tym bowiem przypadku utracona jest własność translacyjności w kierunku prostopadłym do warstwy i używanie tego samego zbioru skwantowanych wartości „prostopadłej” składowej wektora falowego jak w przypadku „bulk” nie jest uzasadnione. Wartości te powinno się

wyznaczać poprzez uwzględnienie *warunków brzegowych* związanych z istnieniem powierzchni w próbce cienkowarstwowej. Trudno mi ocenić konsekwencje dla dalszych obliczeń Autorki wynikające z zastąpienia realnych powierzchniowych warunków brzegowych poprzez warunki periodyczności, ale być może właśnie to uproszczenie stało się jedną z przyczyn dla których, jak pisze sama Autorka w podsumowaniu Rozdziału 10 (str. 159): „*I have failed to reproduce the experimental data on thin layers*”? Moje powyższe uwagi krytyczne należy traktować jedynie jak próbę wskazania Autorce na (być może) tkwiące jeszcze w jej modelu potencjalne możliwości jego dalszego udoskonalenia.

Rozprawa Kandydatki napisana jest ze swadą, językiem wyrażającym precyzyjnie różne subtelności merytoryczne dotyczące aktualnej wiedzy o badanym materiale spintronicznym. Autorka prezentuje przy tym swoją bogatą wiedzę o przedmiocie badań, co stawia ją, w moich oczach, już w rzędzie dojrzałych badaczy. Sugerowałbym więc, aby w dowód uznania dla ujawnionej w rozprawie Jej wiedzy – Kandydatka została zwolniona z konieczności przystępowania do obowiązującego Ją egzaminu doktoranckiego. W zakończeniu stwierdzam oczywiście, iż rozprawa mgr Agnieszki Werpachowskiej spełnia, a nawet znacznie przekracza, wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony. Ponadto wnoszę również o uznanie rozprawy doktorskiej p. mgr A. Werpachowskiej za wyróżniającą się.



Prof. zw. dr hab. Henryk Puszkarski

*P.S. Sugerowałbym także, aby Kandydatka uzupełniła rozprawę dodając do niej listę używanych skrótów (których w rozprawie jest bardzo dużo!); to duże utrudnienie dla czytelnika, gdy musi wielokrotnie poszukiwać pełnego znaczenia skrótów stosowanych prawie na każdej karcie rozprawy!*

Poznań, dn. 15 lipca 2011r.