

RECENZJE
PRZYJATNY


Warszawa, 12 czerwca 2014 r.

Prof. dr hab. Tadeusz Suski

Instytut Wysokich Ciśnień

Polskiej Akademii Nauk

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Piotra Juszyńskiego zatytułowanej: „Badanie wpływu ciśnienia hydrostatycznego i naprężeń wewnętrznych na wybrane własności magnetyczne i transport elektronowy warstw epitaksjalnych GaMnAs”

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr Piotra Juszyńskiego została wykonana w Instytucie Fizyki, Doświadczalnej, Uniwersytetu Warszawskiego. Jej promotorem był Prof. dr hab. Dariusz Wasik. Recenzowana rozprawa jest pracą doświadczalną.

Główny przedmiot rozprawy stanowią badania anizotropii własności magnetycznych warstw (Ga,Mn)As o modyfikowanym stanie naprężenia. Intencją doktoranta było wprowadzenie kontrolowanych zmian naprężenia warstw poprzez wbudowane niedopasowanie sieciowe warstw epitaksjalnych i podłoża oraz przyłożone zewnętrznie ciśnienie hydrostatyczne.

(Ga,Mn)As jest półprzewodnikiem półmagnetycznym o znacznym potencjale zastosowań w spintronice, stanowi również modelowy układ do prowadzenia badań wielu własności tej rodziny półprzewodników zawierających mangan w podsieci kationowej. Zaangażowanie grup badawczych z najlepszych światowych laboratoriów, doprowadziło do uzyskania wielu kluczowych informacji na temat własności (Ga,Mn)As istotnych dla zastosowań. Takich jak na przykład sposób wygrzewania warstw tego materiału w celu rozszerzenia obszaru istnienia fazy ferromagnetycznej aż do około 200K. Należy podkreślić ważną rolę polskich grup w określeniu mechanizmu przemiany para-ferromagnetycznej w (Ga,Mn)As oraz roli w niej manganu. Tematyka podjęta przez doktoranta należy wciąż do bardzo aktualnego obszaru badań fizyki ciała stałego. Doktorant w przeprowadzonych badaniach koncentrował się na sprawach anizotropii własności magnetycznych (Ga,Mn)As, obszaru o wciąż niewystarczającym zasobie informacji potrzebnych dla jego pełnego zrozumienia i dokonania wyczerpującego opisu mikroskopowego. Zagadnienia te są szczególnie ważne wobec faktu, że istniejące struktury (Ga,Mn)As stanowią warstwy epitaksjalne o znacznym stopniu niedopasowania sieciowego w stosunku do podłoża, na

którym odbywa się wzrost. Najczęściej jako podłoże stosuje się GaAs, natomiast wprowadzenie pomiędzy kryształ GaAs i warstwę (Ga,Mn)As bufora z InGaAs (o stałej sieci większej zarówno w stosunku do (Ga,Mn)As jak i GaAs), zmienia stan naprężeń w całej wielowarstwowej strukturze.

Ważnym elementem rozprawy doktorskiej, umożliwiającym uzyskanie nowych informacji na temat własności (Ga,Mn)As było zastosowanie ciśnienia hydrostatycznego do indukowania zmian odległości międzyatomowych, struktury pasmowej i być może koncentracji nośników dziurowych, elementów wpływających na wielkość oddziaływań magnetycznych pomiędzy jonami Mn w matrycy GaAs. A więc na wartość temperatury krytycznej T_C , definiującej przejście fazowe paramagnetyk-ferromagnetyk. Oczekiwano również, że wprowadzenie zewnętrznego naprężenia (będącego skutkiem zastosowania ciśnienia hydrostatycznego w tym wielowarstwowym i naprężonym już w warunkach ciśnienia atmosferycznego układzie), odegra rolę w zrozumieniu relacji pomiędzy własnościami magnetycznymi, ich anizotropią i naprężeniem panującym w badanej próbce.

Rozprawa doktorska została napisana w języku polskim. Zawiera 6 rozdziałów poprzedzonych krótkim wstępem, wprowadzającym temat rozprawy i podstawowe informacje o przeprowadzonych badaniach. Rozdział pierwszy „Wprowadzenie”, zawiera definicje oraz ich krótkie rozwinięcie na temat własności (Ga,Mn)As mierzonych i analizowanych w rozprawie. Są to namagnesowanie i anizotropia magnetyczna, tensor oporności wykorzystany w pomiarach własności magnetycznych oraz fenomenologiczny model Stonera-Wolfartha, z powodzeniem zastosowany do dyskusji otrzymanych wyników. W Rozdziale tym można znaleźć podstawowe informacje na temat 5-ciu użytych próbek (Ga,Mn)As i opisy układów pomiarowych wykorzystywanych przez doktoranta. Chciałbym zwrócić uwagę na właściwy dobór próbek, wyhodowanych metodą niskotemperaturowej epitaksji z wiązek molekularnych (MBE), przez jednego z najlepszych specjalistów - dr Janusza Sadowskiego. Próbkę różniły się wielkością niedopasowania sieciowego, orientacją osi łatwej w stosunku do płaszczyzny (001) struktury (Ga,Mn)As, temperaturą Curie i zastosowanym, lub nie, wygrzewaniem próbki.

W Rozdziale 2 doktorant koncentruje się na opisie badań własności magnetycznych i magnetotransportowych próbek (Ga,Mn)As w obszarze przemiany fazowej II-go rodzaju paramagnetyk-ferromagnetyk. Wiele miejsca poświęcono omówieniu anomalii w przebiegach namagnesowania w funkcji temperatury obserwowanych wykorzystując magnetometr SQUID. Przeprowadzone pomiary pozwalają określić wartość temperatury Curie, T_C . Dla wszystkich badanych próbek. T_C zmienia się pomiędzy około 50K i 120K. Najwyższe

temperatury osiągane są w próbkach poddanych wygrzewaniu tuż po procesie wzrostu epitaksjalnego.

Zastosowana technika pomiarowa, magnetometr SQUID jest skomplikowana i dostarcza informacji o własnościach magnetycznych całej struktury epitaksjalnej: warstwy (Ga,Mn)As, podłoża i ewentualnie wprowadzonego bufora InGaAs. Z tych względów doktorant optuje za korzystaniem z pomiarów zależności anomalii oporności właściwej i odpowiednio jej pochodnej temperaturowej, podając przekonujące argumenty za jej stosowaniem. Pomiar dotyczy w tej sytuacji transportu nośników dziurowych tylko w warstwie (Ga,Mn)As. Metoda ta jest stosowana przez wiele grup badawczych ale podane tutaj, bardzo klarownie argumenty o wiernym odzwierciedleniu zmian własności magnetycznych przez pomiary oporności właściwej warstwy magnetycznej (Ga,Mn)As przekonują do przyjętego w rozprawie rozwiązania. Podano różnice w określeniu T_C przy zastosowaniu obu metod jej wyznaczania. Nie przekraczają kilku stopni i dokładność wyznaczenia rośnie ze wzrostem T_C .

W kolejnej części Rozdziału 2, omawiane są wyniki pomiarów określających zależności namagnesowania i oporu „Hallowskiego”, R_{XY} , od kierunku i wielkości zewnętrznego pola magnetycznego, B . W wykresach zależności M oraz R_{XY} od B pojawiają się histerezy. Przebieg $R_{XY}(B)$ w obszarze przemiany określony jest w zasadniczym stopniu przez tzw. anomalny efekt Halla, charakterystyczny dla przemiany fazowej paramagnetyk-ferromagnetyk. Celem opisanych tutaj badań jest określenie anizotropii własności magnetycznych badanych próbek. Podobnie jak uprzednio, doktorant przekuje, że pomiar własności magnetotransportowych, konkretnie $R_{XY}(B)$, jest bardzo dobrym narzędziem do określenia wpływu pola magnetycznego na własności magnetyczne i stanowi metodę komplementarną do pomiaru namagnesowania. Przeprowadzone pomiary $R_{XY}(B)$ (i jego drugiej pochodnej) dla zestawu badanych próbek analizowano stosując model Stonera-Wolfartha, koncentrując się głównie na określeniu pozapłaszczyznowej stałej anizotropii magnetycznej B_A i jej zależności od temperatury. B_A maleje z temperaturą a jej wartość w badanych w rozprawie próbkach wydaje się rosnać wraz ze wzrostem niedopasowania sieciowego. W kierunku ujemnych (dodatnich) wartości dla dodatniego (ujemnego) niedopasowania. Jedna z próbek nie stosuje się do tej reguły i doktorant podaje możliwe przyczyny takiego zachowania. Pojawia się tutaj pytanie, czy niedopasowanie sieciowe, zaniedbujące możliwą relaksację warstwy (Ga,Mn)As, jest parametrem właściwie określającym naprężenia panujące w próbce wyhodowanej na sieciowo niedopasowanym podłożu. Przeprowadzone przez doktoranta porównanie tych wyników z rezultatami

systematycznych badań, opublikowanych w pracy Glunk et al. Phys. Rev. B, operujących rzeczywistym naprężeniem (wyznaczonym na podstawie pomiarów dyfrakcji rentgenowskiej - mapa sieci odwrotnej) sugeruje istnienie podobieństwa między niedopasowaniem sieciowym i naprężeniem.

W pierwszej części Rozdziału 3, opisującym badania ciśnieniowe, przedstawiono ciekawe i wartościowe z punktu widzenia metodyki pomiarów, porównanie różnych metod wyznaczania temperatury Curie, T_C . Pierwszy z nich to pomiar zaniku pętli histerezy w zależności oporu hallowskiego od pola magnetycznego. Jako miarę wielkości histerezy przyjęto jej pole na wykresie $R_{XY}(B)$. Pole to w fazie ferromagnetycznej maleje z temperaturą zgodnie z $A(T_C - T)^\lambda$ i wykazuje wartość zerową dla fazy paramagnetycznej (λ jest wykładnikiem krytycznym, który jest dopasowywany do konkretnych przebiegów razem ze stałą A i T_C). Drugi sposób wyznaczania T_C to wyznaczanie położenia maksimum oporności R_{XX} w funkcji temperatury. Trzecim jest maksimum pochodnej zmian oporu po temperaturze $dR_{XX}(T)/dT$. Doktorant wskazuje pierwszą metodę jako najbardziej wiarygodną i dającą bezpośredni związek z własnościami magnetycznymi (wielkością namagnesowania) i wyznacza zależność temperatury Curie od przyłożonego ciśnienia dla dwóch badanych szczegółowo próbek charakteryzujących się dodatnią wartością niedopasowania sieciowego. T_C rośnie z ciśnieniem ze współczynnikiem około 0.2K/ kbar. Wyniki te pozostają w zgodności z przewidywaniami uproszczonego modelu opisanego wcześniej w pracy M. Gryglas-Borysiewicz i współpracowników (Phys. Rev. B82, 153204 (2010)). Doktorant nie stwierdza bezpośrednio jaki parametr lub jakie własności próbki mają zasadniczy wpływ na taką zmianę temperatury Curie pod ciśnieniem. Przeprowadzone zostało kolejne porównanie zachowania T_C w funkcji ciśnienia hydrostatycznego dla dwóch próbek zmierzonych w powyżej przywołanej pracy M. Gryglas_Borysiewicz et al.. Charakteryzowały się ujemną wartością niedopasowania sieciowego. Jedna z tych próbek wykazuje wzrost T_C ze wzrostem ciśnienia (zgodnie z przewidywaniami wspomnianego modelu) podczas gdy druga zachowuje się odmiennie - T_C maleje w niewielkim stopniu z ciśnieniem. Brak jest przekonującego argumentu tłumaczącego tego typu zmianę. Z kolei badania anizotropii wykazują wzrost z ciśnieniem zarówno współczynnika odpowiadającego składowej pozapłaszczyznowej (współczynnik B_A) jak i B_C i $-B_U$, odpowiadającym anizotropii w płaszczyźnie.

Rozdział 5. W poprzednich Rozdziałach analizowano wyniki pomiarów przyjmując jednorodny rozkład własności magnetycznych w badanych próbkach (model jednodomenowy). W symulacjach zachowania $R_{XY}(B)$ prowadzi to do perfekcyjnie prostokątnych pętli histerezy. W rzeczywistości, wielodomenowość objawia się brakiem

ostrego skoku w zależnościach typu pętla histerezy. Dodatkowo, w niektórych przebiegach $R_{XY}(B)$, w pobliżu T_C i dla $B=0$ widać niespodziewany skok $R_{XY}(B)$. Wyniki pomiarów magneto oporu $R_{XX}(B)$ wykazują ostre piki i doliny, zmieniające się wraz ze zmianami temperatury w obszarach zmiany kierunku magnetyzacji (próbkowanej napięciem Hallowskim). W celu wyjaśnienia tych efektów mgr P. Juszyński zaproponował bardzo użyteczny model wielodomenowego materiału, z dynamicznie przełączającymi się domenami (P. Juszyński i współpracownicy, J. Appl. Phys. 113, 093708 (2013)). Przeprowadzone symulacje zmian (magneto) oporu odpowiedniej matrycy rezystorów odtwarzają bardzo dokładnie przebiegi $R_{XX}(B)$ i imitują powstawanie wyspowych domen magnetycznych i ich rozchodzenie się w próbce.

Analiza wyników i wniosków zawartych w przedstawionej rozprawie skłoniła recenzenta do zadania następujących pytań:

1. Pomiary w komorze ciśnieniowej własności magnetycznych wykorzystując zmienność parametrów magnetotransportowych. Do jakiego stopnia zmiana temperatury próbki stosowana do określenia zmian T_C (pomiar przy intencjonalnie stałym ciśnieniu) może zmienić jego wielkość? Dotyczy to szczególnie próbek z wyższą temperaturą Curie.
2. Do jakiego stopnia niedopasowanie sieciowe warstw tworzących badane w rozprawie struktury epitaksjalne, odpowiadają stanowi naprężeń warstw (Ga,Mn)As? Szacowanie stanu naprężeń w badanych próbkach odbywało się poprzez porównanie różnic stałej sieci GaAs-GaMnAs i InGaAs-GaMnAs. Czy nie warto było przeprowadzić mapowania sieci odwrotnej badanych próbek, tak by uzyskać wiarygodne informacje na temat naprężenia i stopnia relaksacji struktur? Posiadając takie informacje, bardziej wiarygodne jest dokonane (na Rys. 39) porównanie wyników dotyczących zależności parametru anizotropii pozapłaszczyznowej B_A (w 4.2K) od naprężenia (Glunk et al. Phys. Rev. B79,195206 (2009)) i uzyskanych przez doktoranta, analizujących zależność B_A od niedopasowania sieciowego.
3. Czy była możliwość uzyskania informacji na temat koncentracji dziur w badanych warstwach oraz mechanizmów przewodnictwa, szczególnie w obszarze zachodzenia przemiany fazowej? Jakie były trudności i jakie warunki pomiaru należy zapewnić by je przezwyciężyć?
4. Jakie ograniczenia na interpretację wyników narzucił fakt wielodomenowości badanych struktur w obszarze ferromagnetycznym?

Drobne uwagi redakcyjna: zamieniono numery próbek A962 i A963 w połowie strony 35.

Za najważniejsze osiągnięcia doktoranta uważam:

1. Przeprowadzenie symulacji anomalnych pików magnetooporu w obszarze zachodzenia przemiany fazowej w oparciu o oryginalny, wielodomenowy model ferromagnetycznego kryształu (Ga,Mn)As (P. Juszyński i współpracownicy, J. Appl. Phys. 113, 093708 (2013)).

2. Opanowanie metod pomiarów ciśnieniowych przy użyciu komory cieczowej (tzw. manostatu). Jest to trudna technika pomiarowa wymagająca znacznego talentu od stosującego ją eksperymentatora.

3. Przygotowanie klarownego tekstu rozprawy zawierającego elementy ważne z punktu widzenia:

- a) zrozumiałego opisu wielorakich efektów towarzyszących przemianie fazowej para-ferromagnetyk w (Ga,Mn)As, a szczególnie anizotropii własności magnetycznych tego materiału;
- b) opisu przeprowadzonych doświadczeń, ich interpretacji i krytycznej oceny dokładności pomiarów;
- c) wysokich dydaktycznych walorów tekstu rozprawy.

Konkluzja

Zakres badań przewidzianych do przeprowadzenia w recenzowanej rozprawie obejmował zagadnienia trudne i wciąż rozumiane w niedostatecznym stopniu. Pomimo intensywnych prac w wielu laboratoriach światowych. Analiza przedstawionych rezultatów pozwala stwierdzić, że postawione na początku cele pracy zostały zrealizowane w zadowalającym stopniu. Pojawia się czasem wrażenie, że nie została „doceniona” złożoność efektów odpowiedzialnych zarówno za mechanizm przemiany paramagnetyk-ferromagnetyk w (Ga,Mn)As oraz za sprzężenie własności magnetycznych z własnościami magnetotransportu nośników w tym szczególnym obszarze. W związku z tym interpretacja wyników na poziomie mikroskopowym napotykała ograniczenia, w znacznej mierze związane ze złożonym charakterem badanych struktur.

Oceniam rozprawę doktorską Pana magistra Piotra Juszyńskiego jako satysfakcjonującą recenzenta, pomimo pewnych wątpliwości dotyczących stosowalności

niektórych założeń przyjętych w rozważaniach zawartych w przedstawionym opisie wyników.

Stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji praca spełnia wymogi określone w ustawie o stopniach i tytule naukowym stawiane rozprawom doktorskim i dlatego wnioskuję o dopuszczenie mgr Piotra Juszyńskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Tadeusz Suski

