

Warszawa, dnia 16. września 2010 r.

Prof. dr hab. Grzegorz Karczewski  
Instytut Fizyki  
Polska Akademia Nauk  
Warszawa

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Viktara Stsefanovicha pod tytułem:  
"Magnetyczne własności rozcieńczonych półprzewodników magnetycznych  
(Ga,Mn)As o orientacji podłoża (113)A oraz (Ga,Mn)N"**

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr Viktara Stsefanovicha jest twórczą kontynuacją a zarazem istotnym rozszerzeniem badań własności magnetycznych rozcieńczonych półprzewodników magnetycznych prowadzonych od wielu lat w różnych ośrodkach naukowych, również w Polsce. W Instytucie Fizyki PAN tematykę tą rozwija w ostatnich latach przede wszystkim dr hab. Maciej Sawicki, w którego pracowni wykonanych zostało większość opisanych w rozprawie badań. Rozwój technologii półprzewodników, w tym metod epitaksjalnych, pozwalający na wytworzenie nowych materiałów (takich jak GaMnN i GaMnAs) i struktur powoduje, że tematyka ta jest ciągle aktualna i budząca duże zainteresowanie. O ciągłej aktualności tej tematyki oraz o wysokim poziomie badań prowadzonych przez mgr Stsefanovicha najlepiej świadczy fakt, że wyniki przedstawione w rozprawie zostały częściowo przedstawione w 3 publikacjach w Physical Review B, przy czym jedna z tych publikacji wyróżniona została dodatkową publikacją w Virtual Journal of Nanoscale Science and Technology. Na odnotowanie zasługuje również fakt, że mgr Stsefanovich jest współautorem sześciu innych publikacji, opisujących badania niebędące tematem jego rozprawy doktorskiej.

Z formalnego punktu widzenia, rozprawa składa się z trzech, powiązanych z sobą części. Część pierwsza (rozdziały 1-3) stanowi ogólne wprowadzenie do fizyki badanych zjawisk. W części

tej autor podaje tak podstawowe informacje jak opis struktury krystalograficznej GaMnAs, opisuje skrótowo dotychczasowe wyniki dotyczące przejścia do fazy ferromagnetycznej i temperatury Curie w tym materiale, oraz anizotropii magnetycznej obserwowanej w epitaksjalnych warstwach GaMnAs. Następnie skupia się na informacjach dotyczących drugiego z badanych materiałów – GaMnN. Tu w ujęciu historycznym przedstawia historię badań i kontrowersje dotyczące istnienia wysokotemperaturowego ferromagnetyzmu w tym materiale. Trzeci, ostatni rozdział części wprowadzającej rozprawy stanowi rozdział opisujący wykorzystaną przez autora aparaturę pomiarową oraz zastosowane metody badawcze, W rozdział 3 autor bardzo szczegółowo i obszernie opisał magnetometrię SQUID oraz w znacznie krótszej formie podał podstawowe informacje na temat spektroskopii FMR i magnetometrii magnetoptycznej.

Zasadniczą część rozprawy stanowią rozdziały 4 i 5. W rozdziale 4 autor prezentuje wyniki swoich badań przeprowadzonych na warstwach GaMnAs wyhodowanych na podłożu GaAs (113)A. Autor pisze o trzech badanych próbkach tego typu, choć w istocie była to jedna warstwa podzielona na trzy części, z których dwa zostały wygrzewane w temperaturze 200 C przez 1,5, bądź 5 godz., co wprawdzie zmieniło efektywny skład manganu oraz temperaturę Curie, ale z punktu widzenia ewentualnego wpływu orientacji podłoża na własności magnetyczne warstwy nie ma większego znaczenia. Badana była, zatem w istocie ta sama próbka, co z resztą pokazują otrzymane wyniki, które dla wszystkich trzech warstw są bardzo podobne. Zmierzona zależność pozostałości magnetycznej od temperatury w trzech ortogonalnych kierunkach namagnesowania:  $[-1,10]$ ,  $[33-2]$  oraz  $[113]$  pozwoliła wyznaczyć temperaturę Curie oraz wykazała, że poniżej pewnej charakterystycznej temperatury namagnesowanie wykazuje odejście od kierunku łatwego, czyli  $[-1,1,0]$ . Jak zauważa autor, takie zachowanie jest „identyczne z ogólnym zachowaniem namagnesowania w próbkach GaMnAs osadzonym na podłożu GaAs o orientacji (001) z naprężeniem ściskającym”. Zachowanie to, tak jak w przypadku warstw (001) GaAs autor wiąże z przejściem od anizotropii jednoosiowej w kierunku  $[1,-1,0]$  do anizotropii dwuosiowej kierunkach  $[100]$ , co analogicznie do przypadku (001) GaMnAs opisane zostało poprzez spowodowaną zmianą temperatury rotację wektora namagnesowania w płaszczyźnie (001). Autor uzyskał zadowalającą zgodność opisu z doświadczeniem.

Inną zastosowaną przez mgr Stsefanovicha technikę doświadczalną był pomiar krzywych

namagnesowania w funkcji pola magnetycznego w różnych temperaturach. Z pomiarów tych wyznaczone zostały podstawowe parametry charakteryzujące badany materiał: namagnesowanie nasycenia, pozostałość magnetyczną i pole koercji. W celu określenia anizotropii magnetycznej autor dopasował parametry modelu fenomenologicznego do otrzymanych doświadczalnie krzywych, uzyskując również w tym przypadku bardzo dobrą zgodność. Wyznaczone z dopasowania stałe anizotropii oraz kąt pomiędzy kierunkiem trudnym anizotropii poza-płaszczyznowej oraz kierunkiem [311], wykazują lekką zależność od temperatury potwierdzając wyniki analizy pomiarów pozostałości magnetycznej. Nie jest szczególnym zaskoczeniem, że parametry anizotropii wyznaczone z krzywych namagnesowania również bardzo dobrze opisują zależności kątowe pola rezonansu ferromagnetycznego w różnych płaszczyznach warstw (113) A GaMnAs.

Cennym wynikiem wydaje się potwierdzenie, że model Zenera dla próbek GaMnAs o badanym składzie i koncentracji dziur dobrze opisuje temperaturę Curie oraz znak i amplitudę anizotropii jednoosiowej, pochodzącej od naprężeń w warstwie. Nieco mniejsze od eksperymentalnych wartości kubicznej stałej anizotropii autor tłumaczy istnieniem dodatkowego naprężenia ściskającego, które powinno być ok. 2 razy większe niż w przypadku warstw osadzanych na podłożach (001). Niestety, autor nie próbuje znaleźć innych przyczyn obserwowanej niezgodności ani nie próbuje, np. przez pomiary rentgenowskie wykazać, że takie dodatkowe naprężenie ściskające istotnie ma miejsce. Bardzo interesujące jest natomiast eksperyment magnetoptyczny, w którym mgr Stsefanovich pokazał, że możliwe jest przełączenie poza-płaszczyznowej składowej magnetyzacji za pomocą zewnętrznego pola magnetycznego przyłożonego w płaszczyźnie warstwy.

Rozdział 5 rozprawy mgr Stsefanovich poświęcił opisowi badań materiału stosunkowo mało znanego - GaMnN. W tym przypadku, odwrotnie niż w poprzednim autor dysponował znacznym zbiorem warstw o różnych koncentracjach Mn i grubościach. Dodatkowo warstwy te były bardzo dobrej jakości krystalograficznej oraz bez wytrąceń obcych faz, co pokazała analiza danych rentgenowskich i elektrono-mikroskopowych. Pomiary magnetyzacji wykazały, że w badanym zakresie składów jony Mn są izolowane i można je bardzo dobrze opisać przy pomocy teorii magnetycznych jonów w konfiguracji  $3+$  znajdujących się w polu krystalicznym GaN. Bardzo istotne pytanie, gorąco dyskutowane w literaturze w ostatnich latach czy jest to konfiguracja Mn  $3+$  to konfiguracja  $d^4$  czy  $d^5+h$  nie pozostało jednak bez

odpowiedzi. Autor nie znalazł przejścia do fazy ferromagnetycznej w warstwach GaMnN oraz w strukturze modulacyjnie domieszkowanej wyhodowanej na bazie tego materiału, co jest interesującym choć negatywnym wynikiem.

Badania wykonane w ramach recenzowanej pracy doktorskiej przyniosły kilka ciekawych i wartościowych rezultatów. Najważniejsze osiągnięcia badawcze pracy doktorskiej Viktora Stsefanovicha można podsumować następująco:

1. Wyznaczone zostały stałe anizotropii magnetycznej w warstwach GaMnAs wyhodowanych na podłożach (113) A GaAs.
2. Pokazano przełączanie poza-płaszczyznowej składowej magnetyzacji poprzez pole magnetyczne przykładane w płaszczyźnie próbki
3. Potwierdzona została użyteczność modelu Zenera od opisu własności magnetycznych GaMnAs
4. Stwierdzono, że w GaMnN ze stosunkowo małymi składami Mn jony magnetyczne nie oddziałują ze sobą.
5. Nie wykryto fazy ferromagnetycznej w GaMnN o niskiej zawartości Mn


Rozprawa napisana jest jasno, zrozumiale i w większości dobrą polszczyzną. Zawiera ona bardzo niewielką liczbę potknięć językowych i edytorskich, które nie mają znaczenia dla meritum pracy.

Rozprawa ma również kilka słabszych stron, do których wymienić należy następujące:

1. Praktycznie badana była tylko jedna warstwa GaMnAs na podłożu 113 A GaAs, zatem, jak ogólne są wyciągane na tej podstawie wnioski
2. Zastosowano kilka metod doświadczalnych, które właściwie dały bardzo podobne wyniki
3. Mimo zastosowania bogatego aparatu badawczego, nie stwierdzono istotnego wpływu orientacji podłoża na anizotropię magnetyczną warstw GaMnAs
4. Brak bardziej szczegółowego porównania i dyskusji własności magnetycznych (pole koercji, namagnesowania nasycenia etc). warstw hodowanych na podłożach GaAs o orientacji (001) i (113)A.
5. Nie podjęta została próba eksperymentalnego potwierdzenia dodatkowego naprężenia ściskającego, którego istnienie sugeruje porównanie z modelem Zenera

6. Zbyt długi i szczegółowy wydaje się rozdział poświęcony technice SQUID

Podsumowując, mimo wymienionych wyżej uchybień, przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska zawiera nowe i wartościowe wyniki naukowe, które czynią ją cenną i interesującą. W swoich zasadniczych częściach dotyczy zagadnień ambitnych i będących obecnie centrum zainteresowania specjalistów na świecie. Oceniam pracę doktorską mgr Viktara Stsefanovicha wysoko, mimo wymienionych powyżej uwag szczegółowych krytycznych. Stwierdzam, praca jest spełnia wymagania Ustawy o stopniach i tytułach naukowych. Niniejszym, wnoszę, zatem o dopuszczenie jej do publicznej obrony.



Grzegorz Karczewski