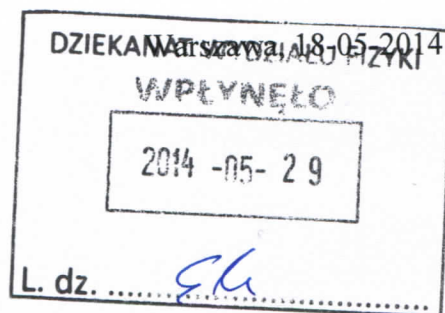


Prof. dr hab. Witold Daniel Dobrowolski

Instytut Fizyki PAN

w Warszawie



**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Piotra Juszyńskiego pt.**

**"Badanie wpływu ciśnienia hydrostatycznego i naprężeń wewnętrznych na wybrane własności magnetyczne i transport elektronowy warstw epitaksjalnych GaMnAs"**

Praca doktorska magistra Piotra Juszyńskiego dotyczy eksperymentalnych badań anizotropii magnetycznej w półprzewodnikowych kryształach mieszanych  $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$  o własnościach ferromagnetycznych. Autor podjął szeroki program badań doświadczalnych metodami transportu elektronowego, w tym pod ciśnieniem hydrostatycznym, epitaksjalnych warstw  $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$  o składach molowych około 0.07. Podstawowym celem Autora było określenie wpływu zewnętrznego ciśnienia hydrostatycznego oraz naprężeń powstałych podczas wzrostu na anizotropię magnetyczną oraz temperaturę przejścia fazowego paramagnetyk-ferromagnetyk. Tematyka pracy doktorskiej dobrze wpisuje się w jedno z głównych zadań fizyki półprzewodników w ostatnim dziesięcioleciu związanych z poszukiwaniem nowych funkcjonalnych materiałów (jednym z nich miał być  $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ ) oraz poznaniem i wyjaśnieniem ich własności fizycznych.

Praca mgr. Piotra Juszyńskiego liczy 130 stron, bibliografia zawiera 51 pozycji. Praca składa się ze wstępu, pięciu rozdziałów, podsumowania oraz dodatków. Rozpoczyna ją półtorastronicowy wstęp określający cele pracy oraz bardzo skrótowne omówienie jej zawartości. Rozdział I "Wprowadzenie" po krótkim omówieniu własności  $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$  oraz wskazaniu niektórych niewyjaśnionych, czy niezbadanych dotychczas zjawisk, przedstawia

cele postawione sobie przez doktoranta. Głównym zadaniem jest zbadanie i analiza zmian anizotropii magnetycznej pod wpływem ciśnienia hydrostatycznego i wpływu ciśnienia hydrostatycznego na temperaturę przejścia paramagnetyk–ferromagnetyk. W dalszej części Rozdziału I Autor omawia źródła anizotropii magnetycznej i metody pomiarów, a w szczególności wykorzystanie zjawiska Halla do badania anizotropii magnetycznej. Następnie wprowadza model (i jego rozszerzoną wersję) Stonera-Wolfartha, model, który w dalszej części doktoratu będzie stosowany do analizy danych doświadczalnych. Dalsza część tego Rozdziału to omówienie badanych warstw epitaksjalnych (łącznie zbadano 5 próbek), w którym zawarto informacje o ich składzie chemicznym (wszystkie zawierały około 6-7 procent molowych manganu), informacje o buforze, na którym hodowano warstwę  $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ , dane nt. niedopasowania sieciowego (od -0.3 % do 0.6%), wyznaczone wartości temperatur krytycznych (od 70 K do 120 K) i inne parametry. Dla dwóch z badanych próbek oś łatwa namagnesowania leżała w płaszczyźnie warstwy, a dla trzech była prostopadła do płaszczyzny warstwy. W Rozdziale tym omówiono ponadto sposób przygotowania próbek do pomiarów i opisano układy eksperymentalne (SQUID, układ magneto-transportowy, komora ciśnieniowa). Rozdział II, zajmujący blisko jedną trzecią część pracy, zawiera wyniki pomiarów magnetycznych i transportowych badanych pięciu warstw. Na podstawie pomiarów namagnesowania w funkcji temperatury określono temperatury krytyczne – mieszczą się one w zakresie 50-120 K. Następnie Autor omawia wyniki pomiarów efektu Halla i tzw. planarnego efekty Halla i wykazuje, że mogą one służyć jako źródło informacji o anizotropii magnetycznej. W dalszej części prezentowane są wyniki pomiarów poszczególnych próbek oraz zostają wyznaczone parametry opisujące anizotropię. Rozdział kończy omówienie zależności wyznaczonych stałych anizotropii od temperatury. Rozdział III ten zawiera szczegółowe wyniki badań transportowych dwóch próbek pod ciśnieniem hydrostatycznym. Pierwsza z próbek miała łatwą oś w płaszczyźnie warstwy, a druga prostopadłą do

płaszczyzny warstwy. Autor analizuje kilka metod wyznaczania zależności temperatury krytycznej od ciśnienia hydrostatycznego (analiza anomalnego efektu Halla, zależności oporu od temperatury i pochodnej oporu po temperaturze). Okazuje się, że wyniki otrzymane z różnych metod różnią się między sobą i to dość znacznie. Autor wiąże występujące różnice z bliżej niezdefiniowanymi różnicami w przygotowaniu próbek do pomiaru (warunki wzrostu, wygrzewania etc). Rozdział kończy się stwierdzeniem, że temperatura krytyczna (za wyjątkiem wyników dla jednej próbki) rośnie z przykładanym ciśnieniem. W Rozdziale IV Autor przedstawia wyniki badań wpływu ciśnienia hydrostatycznego na anizotropię magnetyczną. Okazuje się, że z ciśnieniem wzrasta pole anizotropii (pole potrzebne do skierowania wektora namagnesowania równoległe do osi trudnej), co prowadzi do wzrostu (bądź spadku) parametru anizotropii dla sytuacji osi trudnej bądź łatwej leżącej w płaszczyźnie warstwy. W Rozdziale V przedstawione są dane opisujące wpływ struktury domenowej na magnetoopór w próbkach o dużym naprężeniu epitaksjalnym. Dzięki symulacjom komputerowym Autor pokazuje, że obserwowane eksperymentalnie piki w zależnościach  $R_{xx}$  od temperatury mają swe źródło w strukturze domenowej warstw i związanych z tym nieciągłościach tensora oporności. Wyniki symulacji jakościowo oddają obserwowane eksperymentalnie przebiegi  $R_{xx}$  w funkcji pola magnetycznego  $B$ . Ostatni Rozdział – VI, zawiera zwięzłe podsumowanie pracy i wskazanie najważniejszych zdaniem Autora wyników. W tej kwestii zgadzam się w pełni z oceną Autora. Wspomnę tylko kilka istotnych moim zdaniem wyników. Hipoteza, że istnieje korelacja pomiędzy wartością temperatury krytycznej i jej zmianami (wzrostem) wywołanymi wpływem ciśnienia i wskazanie, że przy niewielkich temperaturach krytycznych trend ten może się odwrócić, niewątpliwie zasługuje na uwagę. Innym istotnym wynikiem jest stwierdzenie, że ciśnienie hydrostatyczne zwiększa pole anizotropii. Również pokazanie błędów czy może różnic w wartościach temperatury krytycznej określonej różnymi metodami zasługuje na uwagę.

Trochę szkoda (choć jest oczywiście możliwe uzupełnienie tej danej), że zabrakło pomiarów w zmiennym polu magnetycznym – i określenia temperatury krytycznej na podstawie zachowania zmiennopolowych podatności magnetycznych w obszarze przejścia fazowego.

Praca napisana jest ładnym, poprawnym językiem. Nie znalazłem istotnych błędów, które mógłbym tu zacytować. Oczywiście zdarzały się niedopracowania, czego nie sposób uniknąć przy pracy tej objętości, np. na stronie 14 znajdziemy niedokończone zdanie. Najwyraźniej Autor w czasie edycji rozdziału, prawdopodobnie przenoszenia urywków tekstu zgubił jakiś (jak się wydaje nieistotny) fragment. Może jeszcze wspomnę, że Autor używa do opisanía przygotowanej metodą litografii struktury pomiarowej słowa hallbar. Trochę mnie to razi. Tekst ilustrowany jest starannie przygotowanymi schematami i diagramami. Autorski układ pracy nie budzi moich zastrzeżeń. Autor wykazuje dobrą znajomość literatury tematu, o czym świadczą między innymi liczne cytowania.

Po tych słowach pochwały chciałbym poruszyć kilka kwestii, które wzbudziły moje wątpliwości. W pracy najbardziej brakuje mi głębszego przeanalizowania wyników własnych na tle danych literaturowych. Mam ponadto uzasadnione wrażenie, że Doktorant nie wykorzystał w pełni wszystkich posiadanych wyników - np. nie znalazłem w pracy informacji nt. koncentracji nośników w badanych próbkach, czy ich zależności od temperatury czy ciśnienia. Można je było uzyskać na przykład na podstawie, mierzonego przecież w pracy, efektu Halla powyżej temperatury przejścia ferromagnetyk– paramagnetyk. Dane takie ułatwiłyby porównywanie wyników z tej pracy z innymi. Możliwa była również była analiza anomalnego efektu Halla. Można się było pokusić o określenie dominującego mechanizmu rozpraszania – który z dwóch mechanizmów dominuje w tym zjawisku: tzw. "side jump" czy "skew scattering" oraz czy występuje tu jakaś zależność od ciśnienia. Brakuje mi również pełniejszej charakteryzacji badanych próbek. Wiadomo, że hodowane metodą MBE próbki GaMnAs nie są doskonałe. Obok niejednorodności w płaszczyźnie warstwy (o czym

wspomniano w pracy) mamy też do czynienia z niejednorodnościami w osi wzrostu. Może warto by zastosować dodatkowo np. metodę SIMS? Jak już wspomniałem, pozyskanie wszelkich danych o próbkach, często nawet nieistotnych z perspektywy prowadzonej pracy, może się okazać niezwykle ważne w trakcie dalszych badań danego materiału.

Niezależnie od powyższych, w sumie drobnych i nieistotnych uchybień, należy podkreślić, że mgr Piotr Juszyński w swojej pracy doktorskiej zrealizował bardzo wartościowy, szeroki program doświadczalnych badań właściwości ferromagnetycznych warstw  $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$  pod ciśnieniem hydrostatycznym, w polu magnetycznym i w szerokim zakresie temperatur. Doktorant umiejętnie wykorzystał szereg technik pomiarowych. Wskazuje to na dobre opanowanie przez mgr. Piotra Juszyńskiego bardzo trudnych i pracochłonnych metod doświadczalnych stosowanych w badaniach zjawisk transportu w półprzewodnikach. Przedstawiona analiza danych i ich szczegółowa dyskusja świadczy o jego dużej wnikliwości i aktywności. Wyniki badawcze uzyskane przez doktoranta mają już swoje odzwierciedlenie w dwóch publikacjach opublikowanych w czasopismach o zasięgu międzynarodowym.

Podsumowując, z pełnym przekonaniem stwierdzam, że rozprawa doktorska "Badanie wpływu ciśnienia hydrostatycznego i naprężeń wewnętrznych na wybrane własności magnetyczne i transport elektronowy warstw epitaksjalnych GaMnAs" spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie magistra Piotra Juszyńskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

W Dobrowolski

PRZYJMIEM

KDL