

Prof. dr hab. Dariusz Wasik
Wydział Fizyki
Uniwersytet Warszawski
ul. Pasteura 5,
02-093 Warszawa

Warszawa, 2 grudnia 2019r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Khrystyny Levchenko
zatytułowanej: „(Ga,Mn)(Bi,As) Dilute Magnetic Semiconductor –
Characterization of the Layers and Electron Transport in Low-
Dimensional Structures”**

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska pani mgr inż. Khrystyny Levchenko jest pracą doświadczalną, poświęconą badaniom własności magnetycznych, strukturalnych i magneto-transportowych cienkich warstw półprzewodnika magnetycznego (Ga,Mn)As oraz związku poczwórnego (Ga,Mn)(Bi,As) - zawierającego domieszki ciężkich atomów bizmutu na poziomie 1%. Praca jest napisana w języku angielskim, liczy 171 stron, składa się z pięciu rozdziałów, poprzedzonych krótkim Wstępem, Podsumowania, obszernej, bo liczącej 142 pozycji Bibliografii. Pracę zamyka lista użytych skrótów oraz krótka informacja o dorobku naukowym doktorantki.

Rozprawa doktorska mgr inż. Levchenko zawiera bardzo bogaty i różnorodny materiał doświadczalny, w tym wiele w pełni oryginalnych wyników. Tematyka pracy jest bardzo ciekawa i wpisuje się w ważny nurt badań rozcieńczonych półprzewodnikowych magnetycznych. W ostatnich dekadach arsenek galu z jonami magnetycznymi manganu był jednym z najintensywniej badanych półprzewodników. I chociaż (Ga,Mn)As nie spełnił pokładanych w nim nadziei półprzewodnikowego ferromagnetyka w temperaturze pokojowej o szerokim zastosowaniach w elektronice, to badania te istotnie poszerzyły wiedzę na temat źródeł ferromagnetyzmu w materiałach półprzewodnikowych oraz przyczyniły się do rozwoju spintroniki. Rozszerzenie badań na materiały czteroskładnikowe (Ga,Mn)(Bi,As) jest interesujące z punktu widzenia analizy oddziaływań magnetycznych, a w szczególności sprzężenia spin-orbita. Rezultaty uzyskane przez mgr inż. Levchenko poszerzają wiedzę na

ten temat i powinny znaleźć zainteresowanie w środowisku badaczy i technologów zajmujących się rozcieńczonymi półprzewodnikami magnetycznymi. Otrzymane wyniki zostały opublikowane w 5 artykułach w czasopismach z tzw. listy filadelfijskiej oraz były prezentowane na licznych międzynarodowych konferencjach i sympozjach w tym jako tzw. wykłady zaproszone.

Rozprawę doktorską mgr inż. Khrystyny Levchenko oceniam wysoko pod względem merytorycznym, ale mam też spory niedosyt związany z opracowaniem i analizą otrzymanych wyników. Ogromny podziw budzi użycie niezwykle szerokiego wachlarza różnych technik eksperymentalnych, które przyniosły bardzo wiele interesujących wyników doświadczalnych. Wyniki te jednak nie zostały w pełni wykorzystane. Brakuje mi w pracy głębszej analizy teoretycznej wyników eksperymentalnych i wniosków końcowych. Zdaję sobie sprawę, że praca doktorska jest dość obszerna, ale bez straty dla jej jakości niektóre fragmenty można było pominąć na rzecz staranniejszej dyskusji otrzymanych wyników.

Chcę jednak podkreślić, że główny cel pracy, tj. określenie wpływu domieszek ciężkich atomów bizmutu na własności magnetyczne arsenku galu z manganem został w pełni zrealizowany, co wymagało od doktorantki zarówno szerokiej wiedzy teoretycznej jak i dużych zdolności fizyka eksperymentatora posługującego się wieloma technikami doświadczalnymi. Wyniki badań przedstawione są w trzech głównych rozdziałach pracy, tj. 3, 4 i 5.

Za najważniejsze osiągnięcia rozprawy doktorskiej uważam:

1. Pokazanie na podstawie eksperymentów spektroskopii relaksacji spinowej mionów, tworzenia się jednorodnego, długozasięgowego, porządku spinowego w warstwach $(\text{Ga}, \text{Mn})(\text{Bi}, \text{As})$. Ponadto, otrzymane wyniki sugerują powstawanie pojedynczej domeny magnetycznej w warstwie w słabym polu magnetycznym.
2. Eksperymentalne potwierdzenie wzrostu sprzężenia spin-orbita wywołanego dodaniem atomów Bi. Efekt ten jest zgodny z przewidywaniami, a objawia się wzrostem wartości pola koercji, ujemnego magneto-oporu oraz planarnego efektu Halla.
3. Pokazanie, że obecność domieszek bizmutu na poziomie 1 % obniża wartość temperatury Curie przejścia paramagnetyk-ferromagnetyk, ale zachowuje charakter anizotropii magnetycznej, tj. oś łatwego namagnesowania pozostaje w płaszczyźnie warstwy poddanej naprężeniu ściskającemu, a w przypadku

naprężenia rozciągającego oś ta jest skierowana prostopadle do powierzchni warstwy.

4. Badania reorientacji domen magnetycznych w nanostrukturach o kształcie ringu i krzyża.
5. Systematyczna charakteryzacja własności fizycznych badanych materiałów przy użyciu bardzo wielu komplementarnych metod doświadczalnych takich jak: wysokorozdzielcza dyfraktometria rentgenowska, spektroskopia masowa wtórnych jonów, mikroskopia elektronowa, spektroskopia Ramana, pomiary magneto-optycznego efektu Kerra, spektroskopia relaksacji spinowej mionów, magnetometria SQUID i pomiary magneto-transportowe.

Niewątpliwym osiągnięciem jest też wyhodowanie bardzo dobrej jakości warstw (Ga,Mn)As i (Ga,Mn)(Bi,As) o różnych parametrach co jest zasługą dr hab. Janusza Sadowskiego.

Pierwsza część rozprawy, tj. krótki Wstęp i Rozdział 1 ma charakter opisowo-informacyjny i stanowi wprowadzenie do tematyki badawczej. W tej części doktorantka nakreśliła też cel pracy, zwięźle uzasadniając powody podjęcia tematyki badawczej. W Rozdziale 2 mgr inż. Levchenko starannie i dość szczegółowo opisała sposób wyhodowania materiałów będących przedmiotem jej badań oraz przedstawiła podstawowe parametry próbek. Rozdział 3 zawiera wyniki pomiarów własności strukturalnych warstw (Ga,Mn)As i (Ga,Mn)(Bi,As) i dzieli się na cztery podrozdziały, każdy poświęcony oddzielnej metodzie badawczej. Prezentacja danych eksperymentalnych poprzedzona jest starannym opisem każdej z użytych technik eksperymentalnych, co wskazuje na dobre zrozumienie i opanowanie przez doktorantkę metod charakteryzacji własności strukturalnych materiałów. Rozdziały 4 i 5 stanowią główną część rozprawy i zawierają najważniejsze, oryginalne wyniki przeprowadzonych badań. Moje duże uznanie budzi zastosowanie wielu różnych technik doświadczalnych, wymagających szerokiej wiedzy i manualnych zdolności technicznych. Doceniam też włożony przez doktorantkę duży trud w uzyskanie bardzo dużej ilości danych eksperymentalnych. Rozprawa doktorska kończy się krótkim podsumowaniem i spisem literatury.

Rozprawa doktorska mgr inż. Khrystyny Levchenko zawiera wiele mankamentów, nie będę ich jednak wszystkich wymieniał i omawiał (zwłaszcza drobnych pomyłek), a skupię się na najważniejszych zastrzeżeniach. Są one następujące:

1. Doktorantka uzyskała bardzo wiele oryginalnych wyników doświadczalnych, które są interesujące (zwłaszcza te przedstawione w Rozdziałach 4 i 5), ale wyniki te nie

zostały w pełni przeanalizowane - mam tu na myśli zarówno opis i wyjaśnienie zaobserwowanych zależności, np. oporności R_{xx} i R_{xy} od pola magnetycznego (Rys. 5.12 – 5.17) czy namagnesowania od temperatury (Rys. 4.11), jak i systematyczną analizę porównawczą wyników uzyskanych różnymi metodami na próbkach z bizmutem i bez bizmutu z uwzględnieniem grubości warstwy i rodzaju substratu (naprężeń wewnętrznych). Przykłady: dlaczego na Rys. 4.12 kształt zależności namagnesowania od temperatury dla próbki z bizmutem jest inny niż dla próbki bez bizmutu? Czy zależności tych nie dało się opisać krzywymi teoretycznymi? Czy zależności amplitudy sygnału MOKE w funkcji temperatury nie można opisać modelem teoretycznym (Rys. 4.7)? Wyjątkiem od tego zastrzeżenia jest analiza teoretyczna słabej lokalizacji. Szkoda, że podobnego podejścia – opisu teoretycznego, zabrakło w odniesieniu do innych wyników doświadczalnych.

2. Ze względu na dużą ilość danych doświadczalnych doktorantka przedstawia wyniki dla wybranych próbek – co jest zrozumiałe, ale w podrozdziałach przedstawiających wyniki pomiarów brakuje mi podsumowania uwzględniającego wszystkie badane próbki. Sama tabelka z „suchymi” liczbami jest moim zdaniem niewystarczająca. W tym kontekście chciałbym się odnieść bardziej szczegółowo do podrozdziału 3.4 dotyczącego spektroskopii ramanowskiej. W arsenku galu z manganem dużym problemem jest wyznaczenie koncentracji dziur z pomiaru efektu Halla. Doktorantka użyła alternatywnej metody opartej na pomiarach efektu Ramana i podała wartości koncentracji dziur dla próbki (Ga,Mn)As o grubości 50 nm i próbki (Ga,Mn)(Bi,As) o takiej samej grubości, obie próbki przed i po wygrzaniu. Wyznaczone wartości są „bardzo rozsądne”. Szkoda, że w pracy doktorantka pokazała rysunek tylko jednej próbki as-grown (Rys. 3.23), brakuje porównania próbki z bizmutem i bez bizmutu, oraz przed i po wygrzewaniu. Interesujące byłoby również wykonanie pomiarów nie tylko wybranych próbek o grubości 50 nm, ale dla całego zestawu badanych warstw. Ale najbardziej interesujące byłoby porównanie wartości koncentracji dziur uzyskane z pomiarów efektu Ramana oraz z wysokopolowych pomiarów efektu Halla opisanych w podrozdziale 5.3. Jak rozumiem, pomiary efektu Halla w wysokich polach zostały wykonane tylko na próbkach o grubości 10 nm. Nie rozumiem, dlaczego nie wykonano wspomnianych pomiarów efektu Ramana i wysokopolowego efektu Halla na tych samych próbkach?

3. W pracy brakuje jakiegokolwiek analizy błędów pomiarowych. Mgr inż. Levchenko podaje w rozprawie doktorskiej wiele liczb uzyskanych w wyniku przeprowadzonych pomiarów, ale nie podaje jaka jest niepewność pomiarowa tych wartości. Wyjątek stanowią dane dotyczące parametru sieci c w zamieszczone w Tabelach 3.2, 3.3 i 3.4.

Pod względem formy edytorskiej praca przygotowana jest bardzo starannie. Poza pominięciem podpisu pod rysunkiem zamieszczonym na stronie 32 i stronie 48 nie dostrzegam błędów. Zwraca uwagę przejrzysty opis Tabel z wynikami oraz opisy pod rysunkami.

Podsumowując, pomimo przedstawionych uwag krytycznych, uważam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Khrystyny Levchenko prezentuje wysoki poziom naukowy. Zawiera bardzo bogaty materiał eksperymentalny uzyskany różnymi technikami pomiarowymi, co wskazuje na duży talent doktorantki jako fizyka doświadczalnika. Prezentowane wyniki dotyczą ważnych problemów występujących w rozcieńczonych półprzewodnikach magnetycznych na bazie arsenku galu, są oryginalne i istotnie poszerzają wiedzę i zrozumienie zjawisk fizycznych w tych materiałach.

Stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska spełnia wymogi formalne i zwyczajowe stawiane przez odnośne przepisy rozprawom doktorskim, a w szczególności stanowi oryginalne rozwiązanie przez doktorantkę zagadnienia naukowego oraz wykazuje jej ogólną wiedzę teoretyczną i umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych. Dlatego wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Khrystyny Levchenko do publicznej obrony pracy.

Dawid Wasił