

Warszawa, 25 listopada 2019 r.

Prof. dr hab. Maciej Sawicki
Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk

**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”,
wykonanej pod kierunkiem prof. dr hab. Tadeusza Wosińskiego
w Instytucie Fizyki PAN w Warszawie.**

Rozprawa doktorska mgr inż. Khrystyny Levchenko przedstawia wyniki badań nad poczwórnym związkiem półprzewodnikowym, pochodną arsenku galowo-manganowego, w którym część atomów arsenu zastąpiono bizmutem. Zgodnie z ogólnie przyjętą nomenklaturą oba powyższe związki są zapisywane jako (Ga,Mn)As – tu mangan ma zastępować gal w pozycjach kationowych, oraz, tak jak w tytule rozprawy, (Ga,Mn)(Bi,As), gdzie dodatkowo Bi ma zastępować arsen w pozycjach anionowych struktury blendy cynkowej, w której to strukturze krystalizują oba związki. Materiał bazowy, (Ga,Mn)As, pełnił rolę niewątpliwego lidera prac badawczych bardzo silnie rozwijającej się od początku XXI wieku spintroniki półprzewodnikowej. Jego obecność w pracowniach badawczych została ostatnio bardzo ograniczona, głównie za sprawą niespełnionych oczekiwań na szybkie opracowanie technik wzrostu i procesowania materiału pozwalających otrzymać i potem zachować ferromagnetyczny stan uporządkowania jonów Mn w temperaturach przekraczających temperaturę pokojową. Według dostępnych danych literaturowych najwyższa osiągalna temperatura przejścia do stanu jednorodnego uporządkowania ferromagnetycznego nie przekracza 200 K, a brak skoordynowanych, zakrojonych na szeroką skalę i stosownie finansowanych badań materiałowych sugeruje, że nie należy oczekiwać istotnej poprawy w tej materii. Tym nie mniej w dalszym ciągu pojawiają się doniesienia literaturowe dokumentujące wyniki badań nad (Ga,Mn)As i jego pochodnymi, gdyż materiały te stanowią bardzo wygodną i względnie dobrze rozumianą platformę badawczą. Pozwala ona na testowanie nowych efektów, architektur i funkcjonalności, które są względnie łatwe do wykazania gdy testowana struktura zawiera w sobie materiał magnetyczny o właściwościach względnie prosto modyfikowalnych wykorzystując jego jednoczesny półprzewodnikowy charakter. Tu pozwolę sobie przytoczyć dwa takie przykłady, jeden z 2000 r., a drugi z 2008 r., kiedy to po raz pierwszy doświadczalnie wykazano możliwość aktywnego wpływu na wielkość temperatury Curie, czyli temperatury, w której substancja przechodzi do fazy ferromagnetycznej oraz na przestrzenne ustawienie wektora namagnesowania. W obu przypadkach wykorzystano zewnętrznie przykładane pole elektryczne. Najważniejsze w tej kwestii jest to, że pomimo osiągnięcia tych pionierskich wyników w temperaturach bliskich zera bezwzględnego, obecnie największe koncerty elektroniczne pracują nad wykorzystaniem powyższych właściwości w komercyjnych układach pamięciowo-logicznych zbudowanych na bazie warstw metalicznych zachowujących właściwości ferromagnetyczne w technologicznie pożądanym wysokich temperaturach.

I w takim kontekście należy spojrzeć na wysiłek Doktorantki opisany w recenzowanej rozprawie. Wzbogacenie podstawowego materiału o bizmut miało na celu wzmocnienie tych poznanych już

właściwości (Ga,Mn)As, które w pierwszym rzędzie zależą od efektów związanych z oddziaływaniem spinowo-orbitalnym, a oczywiście w tzw. wariacie optymistycznym można było oczekiwać nawet na odkrycie jakiegoś nowego zjawiska lub bardzo ciekawej funkcjonalności. Niewątpliwie dobrze naukowo „rozpoznany” półprzewodnik charakteryzujący się silnym sprzężeniem spinowo-orbitalnym, przy zachowanych właściwościach ferromagnetycznych, idealnie wpisywał by się w bardzo intensywnie rozwijany w ostatnim dziesięcioleciu nurt badań nazwany spin-orbitroniką. To z kolei mogło by stymulująco wpłynąć na intensyfikację badań materiałowych nad jego otrzymaniem. W moim odczuciu podjęcie badań nad nowym materiałem o wspomnianych powyżej właściwościach było ze wszech miar celowe i wskazane.

Recenzowana Rozprawa liczy 171 stron. Po streszczeniu, spisie treści i podziękowaniach Rozprawę otwiera 2.5 stronicowe wprowadzenie. Pozostała część rozprawy jest podzielona na 5 rozdziałów, podsumowanie, spis wykorzystanej literatury (zawierający 142 pozycje), po czym następują lista użytych skrótów (jednak niepełna), lista publikacji Autorki oraz 3 strony dodatkowych informacji o aktywności konferencyjnej Autorki. Ta ostatnia część zawiera spis prezentacji plakatowych i wygłoszonych ustnie. Celem zilustrowania prezentowanych w Rozprawie treści Autorka przygotowała kilkadziesiąt ilustracji i wykresów (nie podaję całkowitej liczby, bo większa część ilustracji jest wielopanelowa). Całość cechuje się należytą szatą graficzną. W Rozprawie znajduje się też ok. 10 tabel podsumowujących uzyskane wyniki cząstkowe. Pod względem formalnym to bardzo dobrze, że te tabele zostały przygotowane, niestety, nie stanowią one jednak istotnej pomocy ułatwiającej szybkie porównywanie wyników uzyskanych na poszczególnych etapach pracy badawczej. W zasadzie jedynie tabela 4.3 w rozdziale 4.4 porównuje wartości temperatury Curie uzyskane w bezpośrednich pomiarach magnetycznych i przy pomocy relaksacji spinu mionów w materii. Więcej takich przykładów nie znajduję. Taki brak syntetycznego spojrzenia na swoją pracę uznaję za istotne zaniechanie na etapie przygotowywania tej Rozprawy. Dodatkowo, czytającemu tę Rozprawę, dokonywanie samodzielnych porównań bardzo utrudnia fakt, że Autorka nie zdecydowała się na zastosowanie jednolitego, skrótowego, ale jednoznacznego kodu oznaczającego każdą z badanych warstw/próbek. Zamiast tego w obrębie całej Rozprawy każdorazowo przytaczana jest ich pełna struktura (co oczywiście jest pomocne), ale bardzo często z pominięciem tak istotnych parametrów czy wyróżników jak grubość, czy zawartość Mn. Przyznaję, że takie podejście bardzo utrudniło mi nawigację po Rozprawie, i niejednokrotnie, jak będzie wyszczególnione poniżej, uniemożliwiło samodzielne porównanie wyników zamieszczonych w różnych częściach rozprawy.

Rozprawa doktorska została przygotowana w języku angielskim. I choć w przeważającej części jest napisana poprawnie, to należy zaznaczyć, że Autorka nie ustrzegła się wielu potknięć. Pomijając dość liczne przypadki złego użycia przedimków lub ich braku, co zawsze stanowi wyzwanie dla osób nie wywodzących się bezpośrednio z kultury anglosaskiej, to muszę zaznaczyć, że w wielu miejscach Rozprawy znajdują się uchybienia językowe takie jak błędy gramatyczne, składniowe i stylistyczne, niewłaściwe lub niefachowe słownictwo oraz zwykłe literówki, jak np. „concertation”. Innym przykładem braku staranności językowej jest 3-krotne użycie słowa „diapazon”, np.: „temperature diapazon”, co wg. mnie jest rusycyzmem. Wszystko to razem, niestety, skutkuje tym, że można wskazać miejsca w Rozprawie, które z powodu tych niedociągnięć straciły swój walor informacyjny. Świadczy to chyba o

niedostatecznej koncentracji Autorki nad opracowywanym tekstem w trakcie jego powstawania. Oczywiście nie będę przytaczał tu szczegółowej listy, gdyż jestem przekonany, że wraz z rozwojem kariery naukowej i wzrostem czytania w literaturze fachowej potknięcia widoczne w tej Rozprawie zostaną wyeliminowane. Aby chociaż częściowo ułatwić ten proces przytoczę trzy ważne, bo warte wyeliminowania, przykłady. (i) Badane przez siebie materiały Autorka uważa za *stopy* („alloys”) używając tego określenia 24 razy, a tylko 7 razy posiłkuje się właściwszym określeniem *związek* („compound”). Uwypuklam ten fakt tak mocno, gdyż nawet wyjściowy dla całej rodziny materiał: arsenek galu, GaAs, zaliczony został przez Autorkę również do stopów (str. 26). (ii) Zamiast właściwego określenia „cap” we właściwym tu znaczeniu: warstwa pokrywająca (nakładana w celach technologicznych przed pocienieniem materiału badawczego do badań mikroskopowych), użyto w całym rozdziale opisującym charakterystykę mikroskopową słowa „cup”, czyli kubek, puchar, itd. Niestety nie jest to przypadkowa literówka. Błędne słówko „cup” znajdujemy na wszystkich 10-ciu obrazach mikroskopowych zamieszczonych w Rozprawie, na których widoczna jest warstwa platynowa. (iii) Autorka używa wymiennie wyrażen „lattice constant” i „lattice parameter”. Prawidłowym określeniem jest to drugie. Myślę, że warto pamiętać o poprawnym słownictwie przy przygotowywaniu tekstów oficjalnych. Wzmóżona uwaga jest potrzebna zresztą nie tylko wtedy. Brak swobody w posługiwaniu się językiem angielskim jest też najpewniej przyczyną dużej niespójności gramatycznej tekstu, przejawiającej się między innymi częstymi i nagłymi zmianami trybu narracji pomiędzy czasem przeszłym a czasami teraźniejszymi, zdarza się, że nawet w obrębie jednego zdania.

W rozdziale pierwszym Rozprawy zatytułowanym: „Literature review and the highlights of the crucial facts”, najkrótszym w całej rozprawie (7 stron), Autorka, zgodnie z tytułem, referuje pobieżnie wybrane przez siebie kilka z wielu punktów zwrotnych w historii badań nad (Ga,Mn)As. Jest to oczywiście wybór subiektywny i każdy autor ma prawo do pewnej swobody w wyborze przedstawianych tematów. W tym przypadku Autorka dość szybko prowadzi nas do zagadnień wiążących właściwości magnetyczne materiału z jego właściwościami transportowymi (to pewien żargon, chodzi oczywiście o transport elektronowy), poświęcając dwie ostatnie strony na omówienie podłużnego i poprzecznego anizotropowego magnetooporu - zwanego często planarnym efektem Halla. W dalszej części będę posługiwał się dla wygody i by zachować spójność z Rozprawą angielskiej nomenklatury, a więc odpowiednio: AMR i PHE. Zrozumienie fizyki stojącej za tymi efektami jest kluczowe dla Autorki by zrozumieć i opisać wyniki zaprezentowane w rozdziale 5-tym, dlatego proszę by podczas dyskusji w czasie obrony Autorka wyjaśniła co rozumie pod pojęciem „Hall effect” i dlaczego w (Ga,Mn)As: „... Hall effect measurements are dominated by the Anomalous Hall effect (AHE) and the Planar Hall effect (PHE), ...” (str. 20, 1-sza linijka od góry).

Rozdział drugi zatytułowany: “Getting familiar with the material & method of its growth”, poświęcony jest opisowi metody otrzymywania badanych w rozprawie warstw oraz ich podstawowym właściwościom fizyko-chemicznym. Z obowiązku recenzenta powtórzę za Doktorantką, że materiał badawczy do tej Rozprawy przygotowany został przez prof. J. Sadowskiego podczas jego pracy na Uniwersytecie w Lund, w Szwecji. Składa się on z warstw (Ga,Mn)As i (Ga,Mn)(As,Bi) otrzymanych metodą epitaksji z wiązek molekularnych na podłożach z GaAs buforowanych albo GaAs, lub, celem odpowiedniej zmiany naprężeń ze ściskających na rozciągające, arsenkiem indowym galowym o 20%

zawartości In. Warstwy te posiadały nominalnie 4 lub 6 % Mn i 0.3 lub 1 % Bi. Te i dwa inne parametry zostały zebrane w tabeli 2.1. Interesująco, dopiero w tym miejscu Rozprawca Autorka wprowadza czytelnika w tematykę rozcieńczonych półprzewodników półmagnetycznych (z ang. DMS), zwanych dawniej, choć i obecnie używa się tej nazwy zwyczajowej: półprzewodnikami półmagnetycznymi. Po dość lakonicznym wprowadzeniu Doktorantka przechodzi do rodziny związków III-V z Mn opisując, zwięźle, stan obecny w jakim znajduje się technologia (Ga,Mn)As i podaje argumenty dlaczego jest to nadal ważny i wygodny materiał badawczy. Mam do tej wstępnej części następujące uwagi.

1. wzmiankowane sprzężenie antyferromagnetyczne w interesujących nas DMS-ach jest pośrednie a nie bezpośrednie (str. 22).
2. Stwierdzenie, na tej samej stronie, że w związkach IV-VI z metalami przejściowymi: „a fraction of a host material is replaced with TM ions” zaprzecza całkowicie w tym miejscu idei, która przyświecała szerokiemu gronu badaczy związanych z tematyką DMS od połowy lat 70-tych ubiegłego wieku. Myślę, że jest to pewnie przejęzyczenie, ale bardzo istotne od strony pojęciowej.
3. w tym samym zdaniu symbol „TM” nie jest wyjaśniony.
4. Dziwi mnie fakt, że omawiając oddziaływania magnetyczne w tych materiałach i wspominając o chalcogenidkach ołowiu i cyny z Mn (ciągle str. 22) Autorka nie przypominała, że to właśnie w tych „DMS-ach” wykazano po raz pierwszy możliwość wyidukowania nośnikami prądu jednorodnej fazy ferromagnetycznej. Tym bardziej, że ten pionierski w dziedzinie DMS wynik uzyskano w tym samym Oddziale Naukowym IF PAN, w którym wykonywana była recenzowana Rozprawa.
5. W części 2.2 poświęconej warunkom wzrostu na rysunku 2.1 pokazany jest obraz odbiciowej dyfrakcji wysokoenergetycznych elektronów (RHEED), ale tylko dla (Ga,Mn)As i to pochodzący z 2008 roku. Poproszę o wyjaśnienie, czy jest to obraz RHEED jednej z badanych w pracy próbek? Oraz, czy podobny, świadczący o dwuwymiarowym wzroście obraz RHEED obserwowany był przy wzroście warstw zawierających bizmut.
6. W podrozdziale 2.4 na rys. 2.2 (a) Autorka próbuje przedstawić przestrzenną strukturę komórki prostej GaAs. Przynajmniej, że nigdy dotąd nie spotkałem się z tak źle wykonanym graficznym przedstawieniem struktury blendy cynkowej.

Rozdział ten kończy się opisem czynności, które wykonane zostały przez dra T. Andrearczyka celem przygotowania struktur do pomiarów transportu elektronowego. 4-tym punktem tego przepisu jest godzinne wygrzewanie warstw z nałożonym fotorezystem w temperaturze 180°C. Otóż osobiste doświadczenie piszącego te słowa jest takie, że warstwy (Ga,Mn)As o małych grubościach, takich jak część badanych w pracy, a więc 10, 15, czy nawet 50 nm, reagują na takie wygrzewanie i istotnie zmieniają swoje właściwości magnetyczne i elektryczne. Efekt jest silniejszy im bardziej są cienkie. Np. temperatura Curie i koncentracja dziur potrafi wzrosnąć o 10-50%, tj. w przypadku T_c ten wzrost może wynosić od kilku do 30 K. Pojawia się więc następujące pytanie:

7. Czy wykluczono doświadczalnie występowanie wspomnianych powyżej modyfikacji na skutek tak długotrwałej obróbki termicznej?

Rozdział 3-ci: „Structural characterization” traktuje o charakteryzacji strukturalnej badanych warstw. Dokładniej, przedstawia wyniki: wysokorozdzielczej dyfraktometrii rentgenowskiej, pomiarów

techniką spektrometrii mas jonów wtórnych (SIMS), mikroskopii elektronowej i spektroskopii ramanowskiej, wykonanych na przynajmniej części z badanych w tej pracy próbek. Pomiarów te zostały przedstawione w czterech niezależnych podrozdziałach. Każdy z nich zaczyna się od krótkiego wprowadzenia do właściwej mu metody pomiarowej a ich numeracja jest odzwierciedlona w powyższym wyliczeniu. Należy zaznaczyć, że są to podstawowe, w sensie: „niezbędne” techniki charakterystyczne tych materiałów i jest to godne podkreślenia, że taki wysiłek został podjęty. Uzyskane w trakcie tych pomiarów parametry i charakterystyki materiałowe są z reguły podstawą przy analizie i wyciąganiu wniosków z wyników uzyskanych w czasie wykonywania właściwej pracy badawczej. Również i w tej części znaleźć można szereg uchybień, nieściśłości i niestety, zaniechań.

8. Rozpoczynając formalnie opis wyników dyfrakcji (na dole strony 36) Doktorantka nawiązuje do pierwszej grupy badanych warstw z Bi, nie definiując o które to warstwy chodzi. Jest to pierwszy z wielu takich przypadków, gdzie brak jednoznacznego określenia materiału badawczego bardzo utrudnia lekturę Dysertacji.
9. Tabela 3.2 nie jest powiązana z główną Tabelą 2.1.
10. Ostatni akapit na str. 37 Autorka zaczyna od stwierdzenia, że podawane przez nią koncentracje Bi w związku (Ga,Mn)(Bi,As) są koncentracjami atomowymi, wbrew stosowanemu przez nią zapisowi. W takiej sytuacji staje się niezbędnym by w trakcie obrony Doktorantka wyjaśniła w jakiej konwencji należy rozumieć podawane przez nią koncentracje i czy dotyczy to też manganu. Ta ostatnia wielkość stanowi razem z koncentracją dziur podstawowe parametry determinujące właściwości fizyczne tych związków takie jak np. temperatura Curie.

Ogólnie, należy zauważyć, że zaprezentowane dyfraktogramy jak i mapy sieci odwrotnej wykazały bardzo dobrą jakość krystalograficzną przebadanych warstw oraz zobrazowały zmiany wywołane niskotemperaturowym wygrzewaniem. Przedstawione tabelki zbiorcze zawierają jednak tylko wynikowe parametry krystalograficzne, które oczywiście mają swoją wagę informacyjną, ale nie są wykorzystywane w dalszych badaniach. Piszącemu te słowa zabrakło podania wyznaczonych grubości warstw, a co najważniejsze koncentracji Mn i porównania tych wartości z koncentracjami założonymi na etapie wzrostu - używanymi w całej Rozprawie.

Charakteryzacja SIMS, wykonana przez dra R. Jakiełę z IF PAN i mgr M. Trzynę z Uniwersytetu Rzeszowskiego, należy obecnie do tych najbardziej podstawowych technik badawczych dostarczających, w ramach właściwej jej ograniczeń, informacji o strukturze chemicznej i zawartości pierwiastków, w tym i o domieszkach. Doktorantka do swojej rozprawy wybrała wyniki czterech pomiarów dla warstw „czystego” (Ga,Mn)As i wzbogaconych bizmutem i o różnym buforze, oraz o nominalnej grubości 50 nm, a więc ostatnie 4 próbki wymienione w Tabeli 2.1.

11. Nie zgadzam się Autorką, że widoczne obniżenie sygnałów Ga i As na pierwszych 10-15 nm wynika z utlenienia powierzchniowego. Taki wniosek wyklucza istnienie stechiometrycznych warstw (Ga,Mn)As (i podobnych) o grubościach poniżej 15 nm. Zaprzecza to sensowność prowadzenia na nich szerzej zakrojonych prac badawczych jak i jest w sprzeczności z rozlicznymi danymi literaturowymi. Przypomnę, że istotną część Rozprawy stanowią wyniki uzyskane dla próbek o nominalnej grubości 10 nm.

12. W świetle przedstawionych wyników na rys. 3.8 nie są uprawione wnioski sformułowane w ostatnim akapicie tej części. Po pierwsze, sygnały Ga i As (oraz Bi) nie zostały unormowane do objętości, nie stanowią więc żadnej informacji o takiej czy innej stechiometrii badanych próbek. Po drugie, Autorka nie przedstawia żadnego porównania koncentracji Mn otrzymanej z badań SIMS z wartościami technologicznymi i z wynikami innych technik charakterystycznych. Bardzo proszę o przygotowanie i przedstawienie takiego porównania. Powinno ono uwzględnić również niezaprezentowane w Rozprawie wyniki mapowania materiału metodą EDX (wzmiankowane w następnej części).
13. Również nie mogę się zgodzić z Autorką, że te pomiary wykazały dobrą jednorodność badanych warstw. Już pobieżna analiza tych wyników ujawnia co najmniej 50% wzrost, a na Rys 3.8 (a) nawet 2-krotny wzrost koncentracji Mn w funkcji głębokości warstwy pomiędzy, powiedzmy 10-tym nanometrem i końcem warstwy zawierającej Mn (tj. przy buforze). Czy Autorka widzi na to jakieś wytłumaczenie? W szczególności, czy może mieć to związek z wygrzewaniem? W Rozprawie nie znajdujemy wyników referencyjnych otrzymanych dla próbek wyjściowych, tj. niewygrzewanych, więc nie wiadomo kiedy tak istotny gradient koncentracji Mn zaistniał. No i jaka może być jego rola w innych wynikach przedstawianych w dalszej części Rozprawy.
14. Ostatnia uwaga, dotyczy faktu, że tylko jeden z zaprezentowanych profili Mn kończy się blisko 50 nm. Odczytane z wykresu grubości zmieniają się od 37 do 47 nm. Oczywiście można się spierać na ile dokładnie została wyskalowana oś X na tych wykresach. To można by szacować gdyby wykonano porównanie z wynikami modelowania XRD i odczytanymi z obrazów mikroskopowych prezentowanych w następnej części Rozprawy. Pozostawiony bez komentarza taki wynik sugeruje co najmniej 20% rozrzut prawdziwych grubości warstw magnetycznych. Jest to drugi fakt, który nie został skomentowany w tej części i nie został wzięty pod uwagę na dalszych etapach analizowania następnym wyników pomiarowych.

Mikroskopia elektronowa została wykonana w zespole SL 1.4 przez prof. P. Dłużewskiego i mgr A. Kaletę. Jest to również niezbędny wycinek wysiłku charakterystycznego, bez którego nie można jednoznacznie wykazać adekwatnej do badanych zjawisk struktury badanego materiału. Rzeczywiście, zaprezentowane w tej części obrazy jednoznacznie pokazują wysoką jakość materiału badawczego jakim dysponowała Doktorantka. Rozpatrując tę część nie można nie zauważyć, że:

15. Przy nienumerowanym rysunku na str. 48 Autorka odnosi się do „... outer k-shell of the atom, ...”. Po pierwsze powłoki elektronowe przyjęło się oznaczać dużymi literami alfabetu, po drugie powłoka K jest najbliższą powłoką względem jądra atomowego. Chyba, że Autorka chciała powiedzieć coś innego.
16. Nie bardzo rozumiem dlaczego większość obrazów mikroskopowych zostało umieszczonych tak, że kolejne warstwy składowe są przedstawione w konwencji poziomej i to wbrew orientacji napisów objaśniających. Jest to dość unikalny zabieg. Z reguły obrazy przedstawia się w konwencji pionowej, tak jak np. została narysowana struktura bazowa badanych warstw na rys. 2.3.
17. Kolejnym, już całkowicie dla mnie niezrozumianym zabiegiem opisowym jest opisywanie powiększenia w jakim zrobione zostało każde ze zdjęć używając do tego długości znacznika umieszczonego, jak mi nie mam, automatycznie przez program nadzorujący zbieranie danych. Stwierdzenia typu: „in 100 nm scale” czy „enlarged to 10 nm STEM”, są tyleż niezwykłe, co nic nie

mówiące o prawdziwej wartości powiększenia. Zdecydowanie, mając naniesione na obrazach markery rozmiarowe, nie trzeba już nic więcej pisać o zastosowanym powiększeniu.

18. Na rys. 3.12 i 3.13 i w podpisie wspomniany jest pomiar EDX. Niestety, nie przedstawiono wyników, wspominając tylko, że profile EDX są podobne do SIMS-owych. Jak zauważyłem wcześniej, profile SIMS nie są idealnie gładkie i nie odczytano z nich bezwzględnych wartości koncentracji Mn, to poproszę o przedstawienie takiej analizy porównawczej w trakcie obrony.
19. Analiza EDX może być również pomocna w rozwikłaniu natury tajemniczego ciemnego paska widocznego na obrazach TEM „pomiędzy” wierzchnią warstwą z Mn i naporowanym pokryciem platynowym. Autorka próbuje podać jego pochodzenie odwołując się do wyników SIMS (środkowa część str. 49). Przyznaję, że nie zostałem przekonany przedstawionym tam wywodem, może więc profile EDX zahaczające o ten sam obszar wniosą nowe informacje? Myślę, że warto spróbować i poinformować o uzyskanych wynikach.
20. Obrazy mikroskopii TEM, wykorzystując naniesione na nie markery rozmiarowe, są też bardzo często używane do wyznaczania grubości warstw składowych, ale też nie jest to miara absolutna dla struktur o wymiarach liniowych dochodzących do kilku mm. Tym nie mniej uważam, że należy wyznaczyć i te grubości i porównać zbiorczo z wyznaczonymi poprzednimi metodami.

Wstępne wyniki charakteryzacji ramanowskiej, wykonanej we współpracy z mgr. Rafałem Kuną, stanowią najważniejszą zawartość rozdziału 3.4. Jest to rzeczywiście bardzo użyteczna technika pomiarowa, która ma jednak swoje ograniczenia. Dlatego dobór warunków pomiarowych jak i analizowanie otrzymanych widm ramanowskich powinno je uwzględniać. Szczególnie (Ga,Mn)As jest dość niewdzięcznym tematem takich badań, bo z jednej strony poszerzenie pasm wywołane ogromnym nieporządkiem związanym z obecnością samego manganu jak i towarzyszących mu defektów punktowych, efekt Mossa-Bursteina [J. Szczytko i wsp. Phys. Rev. B 59, 12935 (1999)] i inne jeszcze powody dyskutowane np. w pracy [68], uniemożliwią prostą interpretację zjawiska absorpcji. A ze współczynnikiem absorpcji, dokładniej z jego zależnością od energii przejść optycznych obserwowanych w danym materiale, związana jest głębokość wnikania światła pobudzającego. Określa to, które z warstw badanej struktury są próbkowane w pomiarze rozpraszania ramanowskiego. Jak wiemy, badane w tej Rozprawie próbki nie składają się z samego (Ga,Mn)As. On sam stanowi dość cienką warstwę osadzoną na względnie grubym materiale buforowym o pokrewnej strukturze i składzie chemicznym. Przyjmując za Limmerem i współpracownikami [69] współczynnik absorpcji na poziomie 10^5 cm^{-1} dla (Ga,Mn)As, co również przyjmuje Autorka, otrzymujemy głębokość penetracji wynoszącą 100 nm, a więc dwukrotnie przekraczającą grubość przebadanych tą metodą warstw. Fakt ten już na wstępie oznacza, że przy analizie widm nie można pominąć wkładu od struktur widmowych pochodzących z bufora. Wkład ten być może jest jeszcze większy, gdyż w omawianych tu badaniach użyto dłuższej fali pobudzającej niż używał Limmer i wsp. Wg. danych literaturowych dla czystego GaAs współczynnik absorpcji dla fali o długości 532 nm maleje tak, że głębokość wnikania wzrasta do około 150 nm.

21. Bardzo proszę o ustosunkowanie się do tych wątpliwości technicznych dotyczących samych warunków pomiarowych, zwłaszcza, że na str. 59 Autorka stwierdza, że właśnie fala o długości 532 nm zapewnia odpowiednio małą głębokość wnikania.

22. Przyjmując nawet za Autorką, że przedstawiona w tej części rozprawy analiza ma tylko charakter prowizoryczny, nie można nie zauważyć, że przedstawione na rys. 3.20 – 22 piki są dość znacząco asymetryczne i stosowanie do określania ich dokładnego położenia prostego narzędzia ekranowego programu Origin jest dalece niewystarczające.
23. Ze względów dydaktycznych należy nadmienić, przyjmując za Autorką, że jeśli dokładność powyższej metody rzeczywiście wynosi 0.05 (odpowiednich jednostek) to całkowicie niepoprawne jest podawanie odczytanych z wykresu wartości z dokładnością do drugiej cyfry po przecinku. Np. wartości 291.91, albo 282.49 muszą być zaokrąglone do, odpowiednio: 291.9 oraz 282.5. Itd. Równie nieuprawnione jest podawanie względnych różnic energii w położeniach analizowanych struktur z tą samą dokładnością. Np. wartości obecne na rys. 3.22: +7.78, +9.41, czy -0.55.
24. Wydaje się, że jednym z głównych celów tych pomiarów, oprócz potwierdzenia obecności naprężeń epitaksjalnych, było wyznaczenie koncentracji dziur, wyłuskując z odpowiednich widm parametry tzw. sprzężonego modu plazmonowego (ang. CPLOM), by je potem podstawić do równania 3.9. Próba takiego zabiegu jest przedstawiona na rys. 3.23 i niestety moim zdaniem, z przyczyn wymienionych poniżej, jest to próba całkowicie nieudana. Co więcej, wyniki te zdają się potwierdzać przedstawioną powyżej konstatację o zbyt dużej głębokości wnikania fali pobudzającej. Autorka, jak należy, stara się dopasować do zebranego widma model teoretyczny. Ale poprzestaje na dwóch składnikach, tzw. krzywych Lorentza, i już na pierwszy rzut oka widać, że otrzymane dopasowanie jest złe i to nawet w obszarze wiodącej struktury LO. Jej asymetryczny kształt nie jest odwzorowany numerycznie. Tam ewidentnie czegoś brakuje. Oznacza to, że tylko dwie krzywe Lorentza całego widma nie opisują. Moim skromnym zdaniem, dokłada się tutaj sygnał od bufora. Spodziewana energia fononu LO w (In,Ga)As zawiera się w granicach $271 - 276 \text{ cm}^{-1}$, a więc bardzo blisko obszaru energetycznego gdzie krzywa modelowa najbardziej niedoszacowuje dane doświadczalne. Podobna sytuacja ma miejsce dla niższych energii. Wyraźnie zabrakło kolejnej struktury widmowej w okolicach $220 - 240 \text{ cm}^{-1}$, czyli tam gdzie można się spodziewać odpowiedzi od fononu TO w (In,Ga)As. Przytoczone tu dane materiałowe (In,Ga)As pochodzą od samej Autorki i zostały one podane na str. 60. W tej sytuacji uzyskane i użyte do wyznaczenia koncentracji dziur parametry opisujące kształt modu CPLOM należy uznać za raczej przypadkowe. Zostały one zresztą obarczone bardzo dużym błędem przez sam program dopasowujący. Myślę, że w świetle moich zastrzeżeń, choć chętnie usłyszę gdzie się pomyliłem - gdyż spektroskopia Ramanowska nie jest moją specjalnością, należy raczej zapomnieć o podanych przez Doktorantkę wartościach koncentracji dziur podanych na końcu tego rozdziału i tak naprawdę należałoby powtórzyć pomiary ramanowskie używając światła o zdecydowanie krótszej długości fali.

Z wynikami pomiarów magnetycznych Autorka zaznaja nam w rozdziale 4-tym o lekko nie zrozumiałym dla mnie tytule: „Theory and experiment behind the magnetism”. Na początkowych 9.5 stronach ogólnego wstępu czytelnik zostaje wprowadzony do zagadnień ferromagnetyzmu, w tym i do (Ga,Mn)As, a szczególnie do anizotropii magnetycznej tego ostatniego. Tu muszę uwypuklić pewną niestaranność językową:

25. w połowie strony 72 Autorka pisze o: „<110> in-plane *uniaxial* easy axes.”

Opis pomiarów magnetycznych rozpoczyna się rozdziałem 4.2 opisującym pomiary magneto-optycznego efektu Kerra (ang. MOKE). Tradycyjnie, po lekkim wprowadzeniu teoretycznym, opisie oraz zilustrowaniu aparatury pomiarowej i konfiguracji pomiarowych, na 7-ciu panelach graficznych znajdujemy bogato zilustrowane wyniki pomiarowe. Przedstawione są wyniki w funkcji pola magnetycznego dla różnych orientacji próbek oraz w funkcji temperatury. Ten bogaty materiał faktograficzny jest podsumowany na rysunku 4.7. Na podstawie tych wyników Autorka wysnuwa poprawne wnioski co do podstawowych właściwości anizotropowych badanych próbek. W tej części, jak i zresztą w innych, zdecydowanie brakuje umieszczenia na panelach graficznych szczegółów pomiarowych takich jak rodzaj pomiaru (tu: typ MOKE), temperatury, orientacji, składu chemicznego itd. Co prawda, powyższe informacje można znaleźć częściowo w podpisach lub w tekście Rozprawy, jednak ich wyłuskiwanie zajmuje czas i utrudnia analizę materiału. Autorka trafnie dostrzegła bardzo ciekawy wynik. Otóż na panelach 4.3 (a), 4.5 (a) i 4.5 (b) szerokość pętli histerezy spada do zera. Dzieje się to każdorazowo w temperaturze 55 K. Po czym szerokość pętli histerezy przyjmuje na powrót wartości różne od zera aż do T_C , jak mi nie mam. Chyba nie jest to prosty efekt aparaturowy, bo go nie obserwujemy w danych zaprezentowanych na panelach 4.3 (b) i rys. 4.8.

26. Poproszę o podanie możliwych przyczyn takiego zachowania, zwłaszcza, że żadnego „podejrzanego” zachowania nie obserwuje się w tej temperaturze w bezpośrednich pomiarach magnetometrycznych i mionowych. Nie można ich więc wiązać, jak sugeruje Autorka, z przejściami reorientacyjnymi anizotropii magnetycznej. Jaką nową informację o systemie (Ga,Mn)As dostarczają tu pomiary MOKE?
27. Jak rozumieć stałą szerokość pętli histerezy w temperaturach 6 – 25 K, oraz po jej skokowym spadku w kolejnym szerokim przedziale temperatur: 30 – 80 K? Wynika to z danych przedstawionych na panelu 4.3 (b).
28. Czy badano wpływ prędkości przemieszczania pola magnetycznego w trakcie pomiarów MOKE na kształt i w szczególności na szerokość wyznaczanych pętli histerezy? Hrabowski i wsp. [Appl. Phys. Lett., 81, 2806 (2002)] raportowali takie zależności już w 2002 r. Badania zależne od czasu mają kolosalną wartość informacyjną, informując o znaczeniu zjawisk dynamicznych w tym materiale i ich zależności od temperatury.

W rozdziale 4.3, po bardzo zwięzłym wstępie na temat nadprzewodnictwa, przedstawione są wyniki magnetometrii SQUID-owej. Autorka od razu przechodzi do omawiania wyników nie wspominając jak z surowych danych pomiarowych usunięty został sygnał od podłoża i jak wyznaczyła namagnesowanie warstw zawierających Mn. W szczególności nie wiemy też jakie wartości grubości warstw wzięto do obliczeń namagnesowania. Autorka odnosi się w swoim opisie do wyników SQUID-owych pochodzących z pracy [68], które dla ułatwienia przekazu przywołuje na rys. 4.10, w podpisie którego chyba przez zwykłą nieuwagę zapomniała zaznaczyć, że jest on zapożyczony ze wspomnianej pracy [68]. Autorka, powtarza za pracą [68], że niewielki spadek wartości pola koercji w $T = 5$ K należy przypisać wzrostowi koncentracji dziur po wygrzaniu niskotemperaturowym.

29. Chciałbym poprosić o komentarz na temat wpływu wzrostu koncentracji dziur, tj. mikroskopowego mechanizmu, odpowiedzialnego za wtórujące mu zmniejszenie pola koercji.

30. Niestety, żadne pomiary na prezentowanym rysunku 4.11 nie były wykonane w reżimie tzw. „zero field cooling” jak jest to zaznaczone na str. 91.

Myślę, że dużo zamieszania wnosi środkowy akapit na str. 92 traktujący o kształcie zależności namagnesowania w funkcji temperatury, oraz o porównaniu tych wyników z wynikami MOKE.

31. Nie znajduję dokładnej informacji które próbki są tu porównywane, a nie przedstawiono rysunków porównujących bezpośrednio omawiane zależności.

32. Dlatego nie wiadomo też o jakich dokładne dystorsjach pisze Autorka.

33. Wydaje się, że wspomniane różnice na krzywych $m(T)$ występują w innych zakresach temperatur, stąd nie można prosto przypisać im wspólnego pochodzenia. Poproszę więc aby na obronie Autorka przedstawiła odpowiednie porównanie wraz z jego omówieniem.

W akapicie zaczynającym się na dole strony 92 Autorka rozpoczyna dyskusję o wartościach bezwzględnych namagnesowania. Moim zdaniem, cała ta dyskusja opiera się na niewłaściwych przesłankach, bo dyskutowane jest namagnesowanie w jednostkach na cm^3 , które przecież zależy od koncentracji czynnika magnetycznego w próbce – a jak wiemy próbki różnią się składem Mn i obróbką termiczną po wzroście. Szczególnie w $(\text{Ga},\text{Mn})\text{As}$ namagnesowanie zależy od bardzo wielu czynników. W tym sensie tak przygotowana dyskusja jest z gruntu niemerytoryczna. Co więcej, nie do końca wiadomo, na podstawie których wyników uzyskano dyskutowane w tym fragmencie wielkości. Jest to o tyle ważne, że odnoszę wrażenie, że nie wzięto pod uwagę silnych właściwości anizotropowych materiału. Zdaniem piszącego te słowa najważniejszą jednostką do dyskusji będzie namagnesowanie na %Mn lub w μ_B na 1 atom Mn. Można wtedy bardziej precyzyjnie rozważyć wpływ koncentracji dziur (nie zapominając o namagnesowaniu). Można też rozważyć np. rolę grubości warstw, szczególnie dla warstw bardzo cienkich, poniżej (nominalnie) 15 nm.

W rozdziale 4.4 Autorka przedstawia technikę pomiarów relaksacji spinu mionów w materii. Jest to jeden z najwartościowszych rozdziałów tej Rozprawy, gdyż opisuje wyniki otrzymane przy wykorzystaniu techniki wykorzystywanej bardzo rzadko przez badaczy ze środowiska fizyki półprzewodników, a potrafi ona wnieść dużo informacji na temat lokalnej dynamiki magnetycznej materiału. Przedstawiona na podstawie tych pomiarów argumentacja wydaje się wskazywać na jednorodnie przestrzenne uporządkowanie magnetyczne w tej rodzinie materiałów, w zgodzie z tradycyjną interpretacją Y. Uemury (praca [103]). Podejście to pomija w swoich rozważaniach 6-8 rzędów krótszą skalę czasową próbkowania $(\text{Ga},\text{Mn})\text{As}$ przez miony (charakterystyczny „czas pomiaru” to pojedyncze μs) w porównaniu do technik tradycyjnych takich jak MOKE czy SQUID, gdzie czas pomiaru waha się od ułamka do dziesiątek sekund. Z tego też powodu nie jest to powszechnie podzielana interpretacja (argumenty zostały podane w pracy [17]), co jednak w żadnym stopniu nie podważa analizy przedstawionej przez doktorantkę. Należy też zauważyć, że rozdział ten, jako jedyny w całej rozprawie, kończy się bezpośrednim, wyróżnionym na początku tej recenzji, porównaniem wartości temperatur Curie uzyskanych różnymi technikami. Należy więc tylko wyrazić żal, że w Rozprawie Autorka nie zdecydowała na zamieszczenie większej ilości takich porównań.

Rozdział 5 jest najważniejszym w tej Rozprawie, traktuje o właściwościach magneto-transportowych. Tradycyjnie, zaczyna się on kilkustronicowego przygotowania do tematyki, w którym Autorka „wpada we własne sidła” zastawione raczej niepotrzebnym, bardzo niestandardowym wyborem litery „F” do oznaczania pola elektrycznego. Ja nie mam nic przeciwko takiej czy innej konwencji, ale jeśli się zmienia standardy, to trzeba być konsekwentnym. A tej konsekwencji zabrakło we wzorze 5.26 (str. 113), gdzie nagle pojawia się „ E_y ” w miejscu gdzie oczekujemy składowej poprzecznej pola elektrycznego. To nie koniec problemów w tej części pracy.

34. W obu wzorach 5.25 i 5.26 symbole l_x , n , d , oraz J_x są niezdefiniowane.
35. Problem z literą F widać szczególnie we wzorze 5.24, w którym „eF” zależy od „eF”. Myślę, że powinien być to ten moment w czasie przygotowywania Rozprawy by powrócić do tradycyjnego oznaczania pola elektrycznego.
36. Górna linijka we wzorze 5.28 opisuje kątową zależność anizotropowego magnetooporu (ang.: AMR), a nie magnetoopór (ang.: MR).
37. We wzorze 5.31 w mianowniku pojawia się niewytłumaczona wielkość „NO SQUARE”.

W następnej, 9-stronicowej części, Autorka zaznajamia czytelnika z techniką pomiarową właściwości magneto-transportowych. Rozdziały takie mają zwykle wielkie znaczenie dydaktyczne dla następców, stanowiąc przewodnik po metodach i szczegółach konstrukcji różnych układów pomiarowych. Szczególnie z tych powodów wszelkie informacje powinny być podane z wielką starannością i dbałością o szczegóły. A miejscami tak nie jest.

38. Nie wiadomo co to za cewka i nie opisano jakie kable i po co są podłączane w opisie zaczynającym się na str. 119.
39. Całkowicie niezrozumiałe jest zamieszczenie takiej fotografii uchwytu pomiarowego [Fig. 5.6(e), str. 120], którego najważniejsza część, ta gdzie umieszcza się próbkę, nie mieści się w kadrze. Co Autorka zresztą zaznacza w opisie na stronie 119. Czytamy tam ... „sample mount table (far top right corner of the figure, *not visible*)”, oraz dalej gdy pisze o wspomnianej powyżej cewce: “with a removable coil on top (far top right corner of the figure, *not clearly visible*)”.
40. Przy innym zdjęciu (Fig. 5.5) Autorka oświadcza, że nie zamieściła zdjęcia 6-go uchwytu do pomiarów w konfiguracji równoległej, ponieważ w trakcie robienia zamieszczonego w Rozprawie zdjęcia, uchwyt ten był używany.
41. Moim zdaniem zamieszczone na rys. 5.9 (str. 124) dwa przebiegi pomiarowe nie dowodzą wcale jednoznacznie tak znaczącej redukcji szumów przy wyborze innego, 10-krotnie większego, wzmocnienia przedwzmacniacza. O ile dobrze rozumiem podpis, zaprezentowane na tym rysunku wyniki uzyskano w trakcie fizycznie różnych pomiarów, do których próbka musiała być przemontowana na inny uchwyt pomiarowy itd. Łatwo mogę sobie wyobrazić, że w trakcie tej procedury któryś z kontaktów elektrycznych się obłuzował, powstał tzw. zimny lut, itd., co skutkowało tak dramatycznym pogorszeniem jakości pomiaru, a niekoniecznie miało związek z wyborem wzmocnienia.
42. Myślę, że podobna sytuacja miała miejsce przy pomiarach przedstawionych na rys. 5.15 (str. 134). Przypisany niewłaściwej wartości wzmocnienia przedwzmacniacza radykalny wzrost szumu mógł nastąpić również wskutek fizycznego przemontowywania próbki. Oczywistym są zatem pytania: na

jakim wzmocnieniu wykonano pozostałe pomiary na tym rysunku i dlaczego nie powtórzono pomiaru „czarnego” dla „lepszego” wzmocnienia (x100)?

Z rozczarowaniem muszę więc skonstatować, że z powodu wymienionych powyżej mankamentów oraz nieprzejrzystego języka, nie można polecić tej części Rozprawy jako dobrego źródła informacji o technikach pomiarowych i samych pomiarach zjawisk magneto-transportu w niskich temperaturach dla osób nimi zainteresowanych lub zaczynających pracę naukową.

Na stronie 127 zaczyna się opis uzyskanych wyników i interpretacja. W pierwszej kolejności spotykamy się z pomiarami uzyskanymi w funkcji pola magnetycznego przykładanego w płaszczyźnie próbki. Wyniki przedstawione na rysunkach 5.11 do 5.15 zawierają bardzo bogaty obraz otrzymanych zależności.

43. Niestety, nie do końca jasnym wydaje mi się opis związku obserwowanych zmian z zachowaniem się namagnesowania warstwy (dół strony 127). Jednym z możliwych powodów może być fakt, że Autorka operuje wymiennie nie do końca zdefiniowanymi skrótami, takimi jak: MR, AMR, PH, PHE i że brak jest konkretnego powiązania z odpowiednimi danymi magnetycznymi. Zdecydowanie zabrakło odwołania do rysunku, czy odpowiednio przygotowanej tabeli porównawczej. Poproszę o wyjaśnienie.
44. Po drugie, co znacznie ważniejsze, Autorka przypisuje wartościom pola magnetycznego, w których zamyka się histereza pomiarów transportowych (tzw. „recurrence points”) znaczenie pola anizotropii, co jest w ogólności błędne. Tak więc, podawane w rozprawie wartości pola anizotropii nie są właściwymi wartościami charakteryzującymi te materiały. Z drugiej strony, chciałbym poznać źródło tego określenia, bo obecnie nie jest ono powszechnie używane.
45. Trudno się zorientować w dyskusji Autorki na temat właściwości elektrycznych, gdyż w jej trakcie przy opisie „Sheet resistivity” autorka używa raz jednostek „om-centymetr” (Ωcm), a w innych miejscach pracy pojawia się $\Omega/\text{kwadrat}$. Poproszę więc o wyjaśnienie jakie wielkości Autorka zamierzała dyskutować w rozprawie.
46. Podane na str. 129 wartości różnią się o czynnik 100 z wartościami w Tabeli 5.1.

W ostatnim fragmencie części poświęconej pomiarom wykorzystującym pole magnetyczne przykładane w płaszczyźnie warstwy Autorka referuje wyniki uzyskane na mikronowej wielkości strukturach wykonanych techniką litografii elektronowej. Pomiary te stanowią bardzo ciekawy fragment wsiłku doświadczalnego doktorantki. W tym podejściu wykorzystano twórczo fakt, że w obiektach charakteryzujących się dużym wydłużeniem i mikronowymi wymiarami poprzecznymi jednoosiowa anizotropia magnetyczna powstała na skutek poprzecznej relaksacji naprężeń epitaksjalnych dominuje nad „zwykłą” anizotropią magnetokrystaliczną. Termin „zwykły” odnosi się do warstw naprężonych jednorodnie. Autorka powołuje się właściwie na literaturę światową. Zauważę tylko brak dwóch nazwisk w referencji [132]. Przedstawione w tej części wyniki dobrze pokazują wzrost amplitudy obserwowanych efektów w (Ga,Mn)(As,Bi) co rzeczywiście należy wiązać z obecnością Bi w materiale badawczym.

Rozdział 5 jest zakończony przedstawieniem wyników pomiaru magnetotransportu w silnych polach magnetycznych do 12 T, stanowiących bardzo interesujące zwieńczenie całej Rozprawy.

Wykorzystanie układu ze stabilizacją temperatury pozwoliło na wykonanie pomiarów oporu elektrycznego w funkcji temperatury, z których oszacowano wartości temperatury Curie badanych warstw, stwierdzając, bez przedstawienia dokładnego porównania, że się „z grubsza” zgadzają z wartościami wyznaczonymi w pomiarach magnetometrycznych.

47. Jeśli chodzi o ten fragment to uważam, że pominięcie wyników pracy Novaka i wsp. [Phys. Rev. Lett. **101**, 077201 (2008)] jest dużym niedopatrzeniem i poproszę o nowe oszacowanie wartości T_C z tych pomiarów wraz z porównaniem wartości otrzymanych wszystkimi metodami opisywanymi w tej Rozprawie.

Wykorzystując ten sam układ pomiarowy wykonano pomiary efektu Halla, na podstawie którego wyznaczono koncentracje dziur. Zauważam, że Autorka podała aż 3 wzory opisujące spodziewaną wartość temperatury Curie w rodzinie związków (Ga,Mn)As: 4.17, 4.19, 4.21.

48. Proszę więc o ich wykorzystanie i podanie jakich wartości temperatury Curie można było oczekiwać w tych warstwach, no i oczywiście jak się one korelują z wartościami wyznaczonymi doświadczalnie.

Ta część Rozprawy zakończona jest przedstawieniem wyników pomiaru magnetooporu w silnych polach magnetycznych i ich analizy wykorzystując formalizm tzw. słabej lokalizacji. Na pewno w przypadku cienkich warstw (Ga,Mn)As można by dyskutować czy bardziej pasują wzory dla przypadku dwuwymiarowego czy trójwymiarowego. Ma to być może drugorzędne znaczenie, gdyż i tak podane w tabeli 5.3 wartości iloczynu pędu Fermiego i średniej drogi swobodnej nie odpowiadają ścisłej definicji tzw. słabego nieporządku. Tym nie mniej w ramach zastosowanego modelu odtworzono zmierzone zależności oporu od pola magnetycznego bardzo akuratanie i pokazano, że oddziaływanie spinowo-orbitalne w przypadku próbki zawierającej Bi może mieć znaczenie decydujące o sile obserwowanego efektu (rys. 5.28).

Choć zadaniem recenzenta jest ocena wartości naukowej Rozprawy, to nie sposób nie odnieść się do informacji dodatkowych zamieszczonych w załącznikach do Rozprawy. Wynika z nich, że mgr inż. Levchenko jest współautorką 5-ciu publikacji ściśle związanych tematycznie z zaprezentowaną Rozprawą, a ostatnia publikacja o wynikach spektroskopii mionowej utarowała sobie drogę w tym roku do poczytnego czasopisma Scientific Reports, należącego do Nature Publishing Group. Uzyskane w trakcie prac na doktoratem wyniki zaprezentowane zostały na kilkunastu konferencjach i szkołach międzynarodowych w kraju i za granicą, z czego 2 razy na zaproszenie organizatorów. To rzadko spotykany wynik na tak zdecydowanie początkowym etapie kariery naukowej.

Podsumowując, w Rozprawie przedstawiono wyniki wielu technik charakterystycznych i metod pomiarowych pokazujących, że wbudowanie ciężkiego pierwiastka jakim jest bizmut w tak dobrze znany materiał z rodziny rozcieńczonych półprzewodników półmagnetycznych skutkuje istotnym wzmocnieniem efektów związanych z oddziaływaniem spinowo-orbitalnym, i to pomimo stosunkowo niewielkiej koncentracji, maksymalnie 1%, bizmutu. W mojej ocenie największymi walorami tej Rozprawy są pomiary wykorzystujące relaksację spinu mionów w materii oraz wyniki pomiarów magnetotransportowych, w których wykorzystano litografię elektronową do definiowania położenia i rodzaju ścian domenowych. Z drugiej strony, Rozprawa nie została przygotowana w sposób tak staranny

jak należało tego oczekiwać. Sformułowane w recenzji zastrzeżenia nie umniejszają jednak podstawowych tez Rozprawy, są przyczynkiem do poszerzenia dyskusji. Tak więc z wymienionych powyżej powodów uznaję, że oceniana Rozprawa spełnia w sposób dostateczny ustawowe wymogi stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr inż. Khrystyny Levchenko do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania Jej stopnia naukowego doktora nauk fizycznych, w tym do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.



Warszawa, 25 listopada 2019 r.