

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgra Valerego Kolkovsky'ego
zatytułowanej: „Planar nanostructures made of diluted magnetic
semiconductor – epitaxial growth and transport properties”**

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgra Valerego Kolkovsky'ego jest pracą doświadczalną, poświęconą otrzymaniu metodą epitaksji z wiązki molekularnej (tzw. z ang. MBE) planarnych nanostruktur półprzewodnikowych opartych na związkach Cd(Mn)Te, Cd(Mg)Te i Cd(Zn)Te oraz badaniom własności elektrycznych i optycznych tych materiałów. Praca jest napisana w języku angielskim, liczy 155 stron, składa się z krótkiego wprowadzenia w którym doktorant uzasadnia wybór tematyki badawczej oraz nakreśla cel pracy, a następnie z pięciu rozdziałów, podsumowania oraz obszernego spisu odnośników do literatury, umieszczonego po rozdziałach 1, 3, 4 i 5.

Rozprawa doktorska mgra Kolkovsky'ego jest w pełni oryginalna i zawiera bardzo bogaty materiał eksperymentalny. Doktorant postawił sobie za zadanie wyhodowanie wysokiej jakości magnetycznych nanostruktur półprzewodnikowych, w tym również wytworzenie podstawowych przyrządów spintronicznych, takich jak magnetyczne złącza p-n oraz magnetyczne tranzystory bipolarne, a następnie zbadanie zjawisk fizycznych odpowiedzialnych za ich własności magnetyczne, elektryczne i optyczne. Idea badań prowadzonych w ramach rozprawy doktorskiej wywodzi się z cyklu prac teoretycznych Žutića i Fabiana (opublikowanych w latach 2001-2004) przewidujących w tego typu przyrządach spintronicznych różne efekty spinowe, jak np. efekt magneto-woltaiczny. Należy podkreślić, że tak postawiony przez doktoranta cel pracy jest bardzo ambitny i wpisuje się w jeden z głównych nurtów fizyki i inżynierii półprzewodników magnetycznych. Podjęta przez doktoranta tematyka jest ważna zarówno z punktu widzenia fundamentalnych zjawisk fizycznych, takich jak wstrzykiwanie spinów czy ferromagnetyzm jak i z punktu widzenia inżynierii materiałowej wytwarzania przyrządów elektronicznych opartych na zjawiskach magnetycznych.

W mojej ocenie, przedstawione w rozprawie doktorskiej rezultaty można podzielić na trzy kategorie:

1. Wytworzenie wysokiej jakości magnetycznych nanostruktur półprzewodnikowych oraz przyrządów elektronicznych opartych na związkach tellurku kadmu z manganem, magnezem i cynkiem.
2. Weryfikacja teoretycznych przewidywań Žutića i Fabiana efektów spinowych w magnetycznych złączach p-n oraz magnetycznych tranzystorach bipolarnych.
3. Zbadanie wpływu tzw. efektu gigantycznego rozszczepienia spinowego na własności magneto-optyczne i magneto-transportowe pojedynczych magnetycznych studni kwantowych oraz supersieci spinowych.

Każda z wymienionych kategorii zawiera oryginalne, interesujące wyniki doświadczalne. Szczególnie wysoko oceniam wytworzenie przez doktoranta dużej ilości przyrządów elektronicznych: złącz p-n, p-i-n i tranzystorów bipolarnych. Pomiarów elektrycznych pokazały, że przyrządy te charakteryzują się bardzo dobrymi parametrami jak na urządzenia otrzymane z tego typu materiałów. W drugiej z wymienionych kategorii żmudne i starannie przeprowadzone eksperymenty wykazały, że własności elektryczne złącz p-n, p-i-n oraz tranzystorów bipolarnych nie zależą od przyłożonego pola magnetycznego i tym samym nie potwierdzają istnienia efektów spinowych przewidywanych przez Žutića i Fabiana. Uważam, że chociaż wynik tych pomiarów jest negatywny z punktu widzenia własności magnetycznych i efektów spinowych w badanych materiałach – to jest to wynik ważny i pokazujący kierunek poszukiwań nowych półprzewodnikowych przyrządów spinowych. Mimo wysokiej oceny tej części pracy, chciałbym zwrócić uwagę na zbyt pobieżną, jakościową analizę otrzymanych wyników. Rozważania ilościowe, których zabrakło w rozprawie, mogłyby w istotnie większym stopniu wyjaśnić rozbieżności między teoretycznymi przewidywaniami a otrzymanymi rezultatami doświadczalnymi. Trzecia kategoria – wyniki magneto-optycznych i magneto-transportowych pomiarów supersieci spinowych oraz struktur z pojedynczą studnią kwantową poszerzają wiedzę na temat różnych kanałów przewodnictwa elektrycznego oraz zjawisk odpowiedzialnych za niektóre własności optyczne heterostruktur CdMnTe/CdMgTe.

Teraz szczegółowo omawiam poszczególne części pracy. Rozprawa doktorska rozpoczyna się krótkim uzasadnieniem wyboru tematyki badawczej. Idea rozprawy doktorskiej oparta jest na cyklu prac teoretycznych Žutića i Fabiana, w których autorzy zaproponowali dwa rodzaje nowych urządzeń „spintronicznych”, tj. magnetyczną diodę p-n oraz magnetyczny tranzystor bipolarny w których, wedle przeprowadzonych obliczeń teoretycznych, zewnętrzne pole

magnetyczne w obecności nierównowagowych spinów w złączu, prowadzi do powstania prądu spinowo-spolaryzowanego oraz innych zjawisk spinowych. Głównym celem rozprawy doktorskiej była weryfikacja tych przewidywań, tj. najpierw wytworzenie proponowanych urządzeń elektronicznych, a następnie zbadanie ich własności elektrycznych.

Rozdział 1 stanowi obszerne wprowadzenie w tematykę objętą rozprawą doktorską. W pierwszych podrozdziałach doktorant opisał zasady wytwarzania nanostruktur półprzewodnikowych metodą MBE oraz podstawowe własności związków półprzewodnikowych CdTe i CdMnTe. Najważniejszą część rozdziału stanowi podrozdział 1.4, w którym w przejrzysty sposób opisana jest budowa i własności magnetyczne złącz p-n oraz spinowego tranzystora bipolarnego. Od ogólnej, „szkolnej” wiedzy o diodach i tranzystorach doktorant przechodzi do szczegółowego opisu teoretycznego przyrządów spinowych zaproponowanych przez Žutića i Fabiana. Rozdział kończy się bardzo obszernym i wyczerpującym spisem odnośników do literatury (134 pozycje).

W tej części pracy dostrzegłem kilka następujących drobnych usterek:

Str. 22. Brak wyjaśnienia co oznacza T_0 we wzorach: 1.14 i 1.15.

Str. 29. Brak wyjaśnienia co oznacza symbol E_F we wzorach 1.17 i 1.18.

Str. 32. Na rysunku 1.11a źle zaznaczono zależność prądu „Reverse current” w okolicach zera.

Str. 52. Uważam, iż należało dodać uwagę, że wzór 1.41 dotyczy sytuacji tylko bardzo wąskiej bazy.

W krótkim rozdziale 2 doktorant starannie opisał techniki eksperymentalne używane w pracy doktorskiej, tj. metodę epitaksji z wiązki molekularnej oraz układy doświadczalne do pomiarów elektrycznych, pojemnościowych, elektroluminescencji i fotoluminescencji.

Rozdział 3 poświęcony jest złączom magnetycznym p-n. W ramach rozprawy doktorskiej doktorant wytworzył bardzo dużą liczbę próbek, które dzielą się na trzy serie:

- 1) Warstwa n-typu jest magnetyczna (CdMnTe domieszkowany jodem), natomiast warstwa p-typu jest niemagnetyczna (CdZnTe domieszkowany azotem).
- 2) Warstwa n-typu jest niemagnetyczna (CdTe:I), natomiast warstwa p-typu jest magnetyczna (CdMnZnTe:N).
- 3) Struktury typu p-i-n z magnetyczną lub niemagnetyczną warstwą wewnętrzną.

Wyniki pomiarów magneto-transportowych i pojemnościowych jednoznacznie pokazały, że badane struktury nie wykazują żadnych przewidywanych przez Žutića i Fabiana efektów spinowych. W mojej ocenie jest to ważny wynik doświadczalny, który doktorant tłumaczy

przede wszystkim tym, że wywołana zewnętrznym polem magnetycznym zmiana wysokości bariery jest bardzo mała w porównaniu z początkową barierą niespolaryzowanej diody. Taka interpretacja wydaje się uzasadniona, ale szkoda, że doktorantowi nie udało się wykonać pomiarów (bez podświetlenia) w niższych temperaturach, tj. $T < 50\text{K}$, obecnie możliwych dla prądów znacznie niższych niż podana przez doktoranta granica 10^{-12} A . Ponadto, doktorant wskazuje na inne możliwe zjawiska, które mogą zasadniczo utrudnić zaobserwowanie przewidywanych przez Žutića i Fabiana efektów. Szkoda, że zjawiska te nie zostały szerzej przedyskutowane, a wnioski nie zostały poparte ilościowym rachunkiem. Bardzo bogaty materiał doświadczalny zebrany w tym rozdziale nie został w pełni przeanalizowany i wykorzystany – co w pewnym stopniu związane jest ze „zdrowo-rozśadkowymi” ograniczeniami „objętości” rozpraw doktorskich. Rozumiem również, że doktorant skupił się przede wszystkim na eksperymentalnej weryfikacji przewidywań teoretycznych Žutića i Fabiana i pewnie dlatego pominął rozważania np. na temat jak własności elektryczne złącz p-n zależą od składu manganu, poziomu domieszkowania oraz faktu czy warstwa magnetyczna jest typu n czy typu p (np. widoczne na rysunku 3.5 różnice między rysunkiem (a) i (b) nie są skomentowane). Pewne zastrzeżenia budzi przedstawiona w podrozdziale 3.8 interpretacja wyników pomiarów elektroluminescencji. Doktorant pisze, że pokazane na rys. 3.16 widma są asymetryczne, dlatego mogą być wyjaśnione tylko jako superpozycja dwóch różnych pików – cytując z pracy (str. 100): „This can be only explained by superposition of two different peaks”. Doktorant nie pokazał prostym rachunkiem, że obserwowany kształt daje się rzeczywiście opisać za pomocą dwóch pików o określonym (jakim?) kształcie. Pokazane na rys. 3.17 widmo diody bez studni magnetycznej też jest asymetryczne i bardzo podobne co do kształtu do zaznaczonego na tym samym rysunku widma dla diody ze studnią magnetyczną. Interesujące byłoby zbadanie kształtu i położenia widma elektroluminescencyjnego w funkcji szerokości studni kwantowej, co pomogłoby w jednoznacznej identyfikacji zaobserwowanych widm elektroluminescencji. Na rysunku 3.18 doktorant porównuje wyniki pomiarów polaryzacji kołowej oraz funkcji Brillouina. Różnicę między obiema krzywymi dla pola magnetycznego $B < 5\text{T}$ przypisuje efektom grzania złącza. Jest to możliwe, ale twierdzenie to można było zweryfikować wykonując pomiary dla różnych wartości płynącego prądu przez złącze.

W rozdziale 3 zauważyłem następujące usterki:

- 1) W równaniu 3.8 (str. 95) w mianowniku powinien być znak (+) zamiast (-).

- 2) Na rysunkach prezentujących wyniki doświadczalne nie ma żadnej informacji o błędach pomiarowych.
- 3) W podpisach pod rysunkami (ani na rysunkach) nie są podane numery próbek, których prezentowane wyniki dotyczą, chociaż wszystkie wyhodowane i badane próbki zebrane są w tabeli.

Uwagi 2) i 3) odnoszą się do całej rozprawy doktorskiej.

Rozdział 4 jest kontynuacją rozdziału poprzedniego. Dotyczy poszukiwań efektów spinowych w tranzystorach bipolarnych. Na potrzeby badań doktorant wytworzył serię 12 tranzystorów n-p-n o dobrych parametrach elektrycznych. Podobnie jak w przypadku złącz n-p nie zaobserwowano żadnych efektów spinowych przewidywanych w pracach Žutića i Fabiana. Wynik ten potwierdza podane w poprzednim rozdziale przyczyny tego faktu. Jednakże doktorant nie wyklucza innych możliwych mechanizmów mogących potencjalnie odpowiadać za brak efektów magnetycznych w badanych strukturach. Nie ulega dla mnie wątpliwości, iż uzyskane przez doktoranta wyniki doświadczalne i przedstawione w rozdziałach 3 i 4 są bardzo ważne. Oceniam jako duży sukces wytworzenie dużej liczby dobrej jakości złącz n-p i tranzystorów bipolarnych. Natomiast pewien niedosyt budzi we mnie brak ilościowych rozważań mających na celu potwierdzenie stawianej przez doktoranta tezy, że wysokość bariery potencjału na złączu n-p uniemożliwia obserwację przewidywanych efektów, np. przez wyeliminowanie innych podawanych przez doktoranta możliwych mechanizmów.

Rozdział 5 poświęcony jest badaniom magnetycznych efektów w strukturach z pojedynczą studnią kwantową oraz w supersieciach spinowych. Pomiary zostały przeprowadzone na licznej grupie próbek wyhodowanych przez doktoranta. W pierwszej części rozdziału w oparciu o eksperymenty magneto-optyczne pokazano, że za pomocą zewnętrznego pola magnetycznego można „uwięzić” elektrony o określonej orientacji spinu w studni magnetycznej znajdującej się między niemagnetycznymi materiałami, a także w strukturach z supersieciami spinowymi. Druga część rozdziału dotyczy badań magneto-transportowych. Doktorant przedstawia bardzo interesujące rezultaty doświadczalne, których analiza teoretyczna pokazuje na istnienie dwóch kanałów przewodnictwa elektronowego w strukturach z pojedynczą magnetyczną studnią kwantową. Jeden kanał ma charakter przewodnictwa trójwymiarowego, drugi dwuwymiarowego. W przypadku supersieci zaobserwowano tylko jeden trójwymiarowy kanał przewodnictwa. Pomiary składowej podłużnej tensora oporności wykazały w obu rodzajach struktur występowanie w niskich

temperaturach ujemnego magneto-oporu. Ten fakt doświadczalny doktorant tłumaczy tzw. efektem słabej lokalizacji oraz niedopasowaniem sieci heterostruktur.

W odniesieniu do tej części pracy mam następujące uwagi krytyczne. Doktorant rozdzielił rozważania dotyczące oporności poprzecznej („Hallowskiej”) oraz oporności podłużnej. Ponadto, dla obu przypadków przedstawił na rysunkach wyniki dla różnych próbek (rys. 5.7, 5.8, 5.11, 5.13). W sytuacji występowania różnych kanałów przewodnictwa elektrycznego bardziej właściwa jest spójna analiza całego tensora oporności (lub przewodnictwa) a nie oddzielnie poszczególnych jego składowych. Ponadto, w pracy doktorant pominął analizę ruchliwości, która jest szczególnie istotna w sytuacji zmian rodzaju przewodnictwa (przechodzenie od przewodnictwa trójwymiarowego do przewodnictwa dwuwymiarowego) wywołanych zewnętrznym polem magnetycznym. W podpisie rysunku 5.5 (str. 133) brak opisu co przedstawiają (czym się różnią) rysunki (a) i (b).

Podsumowując, stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgra Valerego Kolkovsky’ego, mimo zgłoszonych wyżej uwag krytycznych, prezentuje wysoki poziom naukowy. Zawiera bardzo bogaty i oryginalny materiał doświadczalny. Zwraca uwagę talent technologiczny doktoranta, który wytwarzył dobrej jakości urządzenia elektroniczne. Praca doktorska istotnie poszerza wiedzę i zrozumienie zjawisk fizycznych występujących w magnetycznych nanostrukturach półprzewodnikowych opartych na związkach tellurku kadmu.

Uważam, że rozprawa doktorska mgra Valerego Kolkovsky’ego w pełni spełnia wymogi formalne i zwyczajowe stawiane przez odnośne przepisy rozprawom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie mgra Valerego Kolkovsky’ego do publicznej obrony pracy.

Dawid Vacił