

Recenzja pracy doktorskiej mgr Wojciecha Knoffa nt. „Półprzewodnikowe ferromagnetyczne warstwy (Ge, Mn)Te – otrzymywanie oraz własności magnetyczne i elektryczne”

Recenzowana rozprawa doktorska powstała w Oddziale Fizyki Półprzewodników (ON-1) Instytutu Fizyki PAN w Warszawie, pod kierownictwem Prof. dr hab. Tomasza Storego. Jest ona wynikiem prac doświadczalnych doktoranta, przeprowadzanych w latach 2005-2010. Rozprawa składa się ze 106 stron, zawiera 62 rysunki i 5 tabel. Zacytowano w niej 106 publikacji, ponadto dodatkowa lista ukazuje dotychczasowe publikacje z udziałem samego doktoranta. Jest on współautorem dość dużej liczby, 21 artykułów, z czego w czterech z nich występuje jako pierwszy autor (dwa opublikowane w „Materials Science – Poland” i dwa w „Acta Physica Polonica”).

Na początku mojej recenzji chciałbym zwrócić uwagę na atrakcyjność i znaczenie samego tematu pracy doktorskiej. Jak wiadomo, krysztaly mieszane $\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ należą do grupy półprzewodników półmagnetycznych, w których występuje ferromagnetyzm wskutek oddziaływania wymiennego pomiędzy jonami magnetycznymi Mn^{2+} , zachodzącego za pośrednictwem swobodnych nośników (mechanizm RKKY). Jakkolwiek badania tego typu materiałów są już od dawna prowadzone w Instytucie Fizyki PAN w Warszawie, to tellurek germanu z manganem zasługuje na wyróżnienie ze względu na szereg unikalnych własności, potencjalnie przydatnych w zastosowaniach. Przede wszystkim, ferromagnetyczna temperatura Curie jest bardzo wysoka i jak pokazały najnowsze wyniki grupy Prof. Springholza z Uniwersytety Jana Keplera w Liznu (Austria) może przekraczać 200 K¹. Ponieważ jony Mn^{2+} są izoelektronowe w stosunku do Ge, oznacza to że ich koncentracja może być zmieniana niezależnie od liczby nośników swobodnych, które z kolei mogą być kontrolowane przez niezależne domieszkowanie. Co więcej, $\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ jest także ferroelektrykiem w zakresie od $x = 0$ do $x \approx 0.2$. Ostatnio opublikowane dane sugerują istotny wpływ własności ferroelektrycznych na ferromagnetyzm w tym materiale². A zatem $\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ można faktycznie zaliczyć do *multiferroików*, czyli materiałów w których mamy się kilka wzajemnie oddziałujących na siebie faz uporządkowania. Ta grupa materiałów obecnie bardzo intensywnie badana, ze względu na ogromne perspektywy zastosowań praktycznych w spintronice (elektrycznie sterowane własności magnetyczne). Dodatkową niezwykłą własnością stopów $\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ jest możliwość realizacji przejścia fazowego pomiędzy fazami amorficzną i polikrystaliczną. Niewątpliwie, wynika to z podobieństwa do szkielek chalcogenidkowych, takich jak GeSbTe. Jak wiadomo, na bazie tego ostatniego materiału działają pamięci typu „phase change” (PRAM), oparte na zjawisku ogromnej zmiany oporu elektrycznego, związanej z takim przejściem fazowym. Pamięci PRAM mają wiele zalet w porównaniu z dotychczas używanymi pamięciami typu FLASH, ponieważ są łatwo skalowalne do małych rozmiarów i szybkość zapisu sięga pojedynczych nanosekund. W 2009

¹ Patrz: M. Hassan, et al., J. Crystal Growth (2010), doi:10.1016/j.jcrysgro.2010.10.135

² Patrz: H. Przybylińska, R.T. Lechner, H. Malissa, M. Havlicek, G. Springholz, W. Jantsch G. Bauer, 5th International School and Conference on Spintronic and Quantum Information Technology Spintech, Kraków 2009 - abstract book str. 186.

roku firma Samsung wyprodukowała pamięć PRAM o pojemności 0.5 GB i szybkości dostępu 5 ns. Uważa się, że pamięci PRAM są na progu komercjalizacji.

Wszystkie te okoliczności świadczą o bardzo trafnym wyborze kierunku badawczego i tematu pracy doktorskiej przez mgr inż. Wojciecha Knoffa i jego opiekuna. Tak różnorodność ciekawych własności dawała doktorantowi szerokie pole do intensywnej działalności badawczej. Należy też zwrócić uwagę, że dysponował on bogatym warsztatem doświadczalnym, który jest obecnie dostępny w IF PAN Warszawa.

Wyniki tej działalności znalazły się w recenzowanej rozprawie którą zamierzam teraz omówić. Jest ona podzielona na 5 głównych części. Część I zatytułowana „**Podstawowe własności półprzewodnikowe, magnetyczne i strukturalne GeTe i GeMnTe**” zawiera przegląd istniejących danych dotyczących tych materiałów, ujętych odpowiednio w rozdziały 1 i 2. Zamieszczenie opisu własności czystego GeTe, wydaje się bardzo właściwe gdyż jest on punktem odniesienia dla stopów z MnTe. Przegląd własności $Ge_{1-x}Mn_xTe$ skupia się głównie na warstwach epitaksjalnych i zgodnie z moim rozeznaniem, zawiera wszystkie najważniejsze wyniki, uzyskane dotychczas w innych laboratoriach. Być może jednak przydałaby się bardziej rozszerzona analiza własności warstw uzyskiwanych różnymi metodami i dla różnych parametrów wzrostu. Pozwoliłaby ona lepiej ocenić stan technologii wykorzystywanej przez doktoranta na tle osiągnięć światowych. Wydaje się bowiem, że parametry wzrostu mają zasadniczy wpływ na własności magnetyczne warstw. Świadczy o tym fakt, że warstwy otrzymanywane metodą MBE w różnych ośrodkach wykazują ferromagnetyczne temperatury Curie różniące się o czynnik kilka, nawet dla takich samych składów manganu i przy podobnych koncentracjach swobodnych dziur.

Część druga „**Technologia wytwarzania warstw**” zawiera tylko jeden rozdział (nr 3) opisujący proces epitaksji warstw $Ge_{1-x}Mn_xTe$ metodą wiązek molekularnych (MBE). Przedstawiono tutaj standardowy opis stanowiska MBE oraz warunki wzrostu badanych warstw. Stwierdzono, że wzrost warstw $Ge_{1-x}Mn_xTe$ ma charakter mieszany, składa się na niego zarówno mechanizm dwuwymiarowy (van der Merwe'a) jak i mieszany warstwowo-wyspowy (Stranskiego-Krastanowa). Jako kryterium doboru warstw do dalszych badań, doktorant podał trzy ich cechy: 1)obecność fazy pików w dyfrakcyjnej analizie strukturalnej, pokazujących dominującą obecność fazy monokrystalicznej 2)obecność przejścia paramagnetyk-ferromagnetyk 3)jednorodność elektryczną warstw. Wydaje się to oczywiste, podobnie jak wybór składów zawierających około 10 % manganu, charakteryzujących się najlepszymi parametrami strukturalnymi i magnetycznymi. Dla tych bowiem składów struktury krystaliczne są najlepsze i uzyskuje się bardzo wysokie temperatury Curie (patrz odnośnik literaturowy nr 10) Oprócz procesu samego wzrostu warstw, doktorant także opisuje procesy dodatkowego wygrzewania prowadzące do polepszenia ich własności.

Część trzecia „**Charakteryzacja strukturalna warstw epitaksjalnych $Ge_{1-x}Mn_xTe$** ” zawiera trzy rozdziały (4-6). W rozdziale 4 zamieszczono wyniki analizy rentgenowskiej badanych warstw, pokazujące dobrą strukturę krystaliczną warstw $Ge_{1-x}Mn_xTe$ z koncentracją manganu w zakresie od 5% do 15 %. Pokazano, że wartość stałej sieci w tym zakresie składów pokrywają się z danymi uzyskanymi przez grupę japońską z Uniwersytetu Yamaguchi. Ciekawy jest wynik pokazany na rysunku 4.4, gdzie widać widmo dyfrakcji jednej z warstw $Ge_{1-x}Mn_xTe$ przed i po procesie dodatkowego wygrzewania. Wyraźnie zaznacza się zwięźnienie głównego pików w wyniku tego procesu. Doktorant jednak nie komentuje tego faktu, który zapewne świadczy o pozytywnym wpływie wygrzewania na strukturę krystaliczną badanych warstw. Wątpliwy natomiast jest argument o „zwiększeniu intensywności niejednorodności” która „najprawdopodobniej jest obszarem zubożonym w mangan”. Ciekawym wynikiem doktoranta w dziedzinie badań strukturalnych jest też zaobserwowanie transformacji od struktury romboedrycznej do struktury soli kuchennej w $Ge_{1-x}Mn_xTe$ przy użyciu dyfrakcji rentgenowskiej, przedstawione w podrozdziale 4.2.

W rozdziale 5 przedstawiono przykładowe wyniki badań przy pomocy mikroskopii sił atomowych. Doktorant pokazuje, że struktura powierzchni warstw istotnie zależy od warunków wzrostu, a konkretnie od strumienia telluru. Może tylko szkoda, że wynik ten nie jest powiązany bezpośrednio z wynikami pomiarów magnetycznych i elektrycznych. W rozdziale 6, widzimy wyniki pomiarów składu pierwiastkowego badanych warstw metodą spektroskopii jonów wtórnych (SIMS). Pokazują one, że warstwy są chemicznie jednorodne w kierunku wzrostu. Należy jednak podkreślić, że SIMS uśrednia skład po powierzchni o rozmiarach kilkudziesięciu mikrometrów, a zatem uzyskany wynik nie wyklucza istnienia mniejszych niejednorodności.

Część IV „**Pomiary własności magnetycznych**” zawiera zasadnicze wyniki pracy i one, moim zdaniem, stanowią o ostatecznej, pozytywnej ocenie jej wartości. Rozdział 7 jest poświęcony pomiarom przy pomocy magnetometru SQUID-owego. Na początku mamy krótki opis układu eksperymentalnego. Następnie doktorant opisuje standartowe metody wyznaczania istotnych parametrów magnetycznych. Pierwszą obserwacją jest duża różnica pomiędzy paramagnetyczną i ferromagnetyczną temperaturą Curie w badanych warstwach $\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$. Taki efekt był już sygnalizowany dla tego materiału (patrz odnośnik 106) i świadczy o niejednorodnym rozkładzie jonów magnetycznych. W podrozdziale 7.2.2, doktorant przedstawia własności magnetyczne warstw $\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ w funkcji strumienia telluru stosowanego w czasie wzrostu w komorze MBE. Okazuje się, że wartość T_c i namagnesowania jest najwyższa dla strumienia równego 1.3×10^{11} molekuł/cm²s. W kolejnym podrozdziale, 7-2, przedstawione są wyniki magnetyzacji warstw $\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ poddanych dodatkowemu wygrzewaniu w próżni lub w argonie. Stwierdzono, że wygrzewanie przez 90 minut w temperaturze 350° C daje znaczne podwyższenie T_c , a zastosowanie wyższych temperatur i dłuższych czasów powoduje jej obniżenie. Pomiar SQUIDowe magnetyzacji pokazały również, że magnetyzacja warstw wykazuje anizotropię w kierunku prostopadłym do powierzchni. Efekt ten będzie szczegółowo rozpatrywany w rozdziale 8 rozprawy.

W kolejnym podrozdziale doktorant pokazuje wyniki pomiarów magnetyzacji dla warstwy amorficznej $\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$. W tym wypadku jest ona paramagnetyczna w całym zakresie badanych temperatur. Proces rekrytalizacji został przeprowadzony poprzez naświetlanie laserem impulsowym. W jego wyniku powstała warstwa polikrystaliczna wykazująca własności ferromagnetyczne. Dla takich warstw zaobserwowano bardzo dużą różnicę temperatur Curie, ferromagnetycznej (53 K) i paramagnetycznej (79 K), co świadczy o ich niejednorodnej strukturze magnetycznej. Tym niemniej, możliwość uzyskiwania kontrolowanych obszarów ferromagnetycznych w paramagnetycznej, i jeszcze do tego izolującej matrycy, ma duże znaczenie praktyczne.

Rozdział 7 jest zakończony podrozdziałem teoretycznym, w którym doktorant stara się opisać wyniki uzyskanych pomiarów wielkości magnetycznych. Najpierw mamy próbę dopasowania modelu pola średniego do magnetyzacji zmierzonej w polach do 7 T. Doktorant zakłada, że próbka składa się z rozdzielonych przestrzennie obszarów ferromagnetycznych i paramagnetycznych, których obecność wynika z niejednorodnego rozkładu jonów Mn. Jak pokazuje rysunek 7.17, zakładany model nie jest w stanie odtworzyć większości danych eksperymentalnych. Doktorant szacuje, że tylko od 20% do 40 % jonów Mn w warstwie daje przyczynek do ferromagnetyzmu wywołanego oddziaływaniem RKKY. To wszystko wskazuje na wielofazową strukturę magnetyczną warstw, której nie można ująć prostym podziałem na ferromagnetyk i paramagnetyk. Obecność wielu faz magnetycznych i co więcej, skomplikowanych oddziaływań pomiędzy nimi, została ostatnio pokazana przez grupę z Uniwersytetu Jana Keplera w Linzu (Austria) [patrz odnośnik 88 w Bibliografii rozprawy]. Lepszą zgodność z eksperymentem uzyskano dla obliczeń T_c w funkcji x i koncentracji

swobodnych dziur, przeprowadzonych w ramach modelu RKKY. Zostały one wykonane przez doktoranta we współpracy z grupą teoretyków z Uniwersytetu Łódzkiego.

Rozdział 8 należący do omawianej części IV, zawiera wyniki pomiarów rezonansu ferromagnetycznego w warstwach $\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ dla $x=0.1$ i $x=0.19$. Według mojej oceny jest to najbardziej oryginalna i wartościowa część omawianej rozprawy. Na początku mamy omówienie badanego zjawiska i metody jego pomiaru. Jak wiadomo, rezonans ferromagnetyczny jest podstawowym narzędziem do badania anizotropii ferromagnetyków i dlatego doktorant zamieszcza szczegółowe omówienie różnych rodzajów anizotropii magnetycznej. Uzyskane dane eksperymentalne potwierdzają wynik SQUID-owych pomiarów magnetyzacji, że łatwym kierunkiem namagnesowania dla badanych warstw jest kierunek prostopadły. Przepuszczalnie jest to związane z romboedrycznym odkształceniem komórek elementarnych w warstwie w kierunku wzrostu warstw [111]. Anizotropia ta jest na tyle silna, że dominuje nad anizotropią kształtu, dążącej do ułożenia osi łatwego namagnesowania w płaszczyźnie warstwy. Twierdzenia doktoranta o dodatkowym wpływie naprężeń termicznych, wynikających z różnicy współczynników rozszerzalności warstwy i podłoża (str. 46), nie są jednak poparte wynikami badań strukturalnych, ani danymi literaturowymi. Pomimo, że dokładne pochodzenie dominującego wkładu anizotropii prostopadłej nie jest znane, doktorantowi udało się zmierzyć jej wartość oraz odtworzyć w obliczeniach obserwowaną zależność kątową rezonansu ferromagnetycznego. Ciekawym przyczynkiem do dyskusji na temat pochodzenia anizotropii prostopadłej w $\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ jest jej znaczna redukcja po poddaniu warstwy wygrzewaniu w próżni (podrozdział 8.3.3). Sugeruje to, że anizotropia prostopadła może nie być efektem samoistnym, lecz wynikać z jakiegoś niesymetrycznego rozkładu jonów magnetycznych, który być może jest ujednorodniony przez wygrzewanie.

Na końcu rozdziału 8 przedstawiono wyniki rezonansu ferromagnetycznego zmierzonego na $\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ poddanemu procesowi rekrytalizacji przy pomocy lasera impulsowego. W wyniku naświetlania laserem amorficznej warstwy, spowodowano przejście do struktury polikrystalicznej. Wykazuje ona własności ferromagnetyczne dla których dominujące znaczenie ma anizotropia kształtu (oś łatwa w płaszczyźnie warstwy). Ponadto stwierdzono, że obszary zrekrystalizowane są izotropowe względem kierunków na płaszczyźnie warstwy.

Ostatnia, V część rozprawy „**Własności elektryczne $\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$** ” jest poświęcona wynikom pomiarów zjawisk transportu. Ten rozdział budzi stosunkowo najwięcej moich zastrzeżeń. Podobnie jak grupa badaczy z Uniwersytetu w Singapurze (odnośnik nr 38), doktorant zaobserwował wyraźne minima w zależności temperaturowej oporu warstw, których położenie niewątpliwie jest skorelowane z przejściem ferromagnetycznym. Ten intrygujący wynik powinien zostać szerzej skomentowany, ponieważ w obszarze przejścia można się spodziewać raczej maksimum oporu związanego z rozpraszaniem krytycznym. Takie maksimum jest na przykład obserwowane w innym półprzewodniku ferromagnetycznym $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$, obecnie intensywnie badanym w Instytucie Fizyki PAN w Warszawie. Ważnym efektem charakteryzującym warstwy ferromagnetyczne jest też anomalny efekt Halla. Doktorant przedstawia wyniki pomiarów tego zjawiska w warstwach $\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$. Brak jednak głębszej interpretacji, a w szczególności porównania możliwych do wyznaczenia parametrów magnetycznych z uzyskanymi z pomiarów magnetyzacji (patrz część IV rozprawy). W szczególności, do wyznaczenia T_c można by tutaj użyć analogicznej metody krzywych Arrotta, jak to zrobiono na przykład w pracy.³ Warto było również sprawdzić skalowanie anomalnego oporu Halla z przewodnictwem właściwym [patrz wzór

³ Patrz: K. Ohno, S. Ohya, M. Tanaka, J. Of Supercon. Nov. Magn. **20**, 417 (2007).

(2.3) na końcu części I rozprawy], gdyż to pozwoliłoby ustalić mechanizm rozpraszania na centrach magnetycznych.

Najbardziej zaskakujący jest wynik przedstawiony na rysunku 9.6 i towarzyszące mu stwierdzenie, że niektóre warstwy $\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ wykazują elektronowy typ przewodnictwa (typ n). Wydaje się to być sprzeczne z całą dotychczasową wiedzą na temat materiału. Bynajmniej nie zamierzam negować tej obserwacji doktoranta ale uważam, że w takim przypadku powinien on przeprowadzić szczególnie wnikliwą analizę eksperymentalną oraz przedstawić ilościową statystykę takich warstw. Brak jest również wyznaczonych wartości ruchliwości i drogi swobodnej nośników w badanych warstwach, chociaż doktorant zaznacza, że iloczyn $k_F\lambda$ jest znacznie większy od 1.

Rozprawa jest zakończona podsumowaniem, zawierającym wyliczenie wyników uzyskanych przez doktoranta.

Podsumowując mój przegląd rozprawy, stwierdzam, że doktorant przeprowadził bardzo szerokie badania doświadczalne i uzyskał mnóstwo interesujących wyników. Jednak zamieszczenie ich wszystkich w rozprawie odbiło się na jakości interpretacji, która często jest zbyt pobieżna. Gdyby doktorant skupił się na jednym zasadniczym problemie np. zależności magnetyzacji i anizotropii $\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ od parametrów technologicznych, dałoby to znacznie bardziej przejrzystą i użyteczną pracę. Sądzę, że część o pomiarach transportowych można było spokojnie pominąć. Układ pracy jest nieco zawikłany, mamy aż cztery poziomy numerowania podrozdziałów. Na przykład o wpływie wygrzewania na anizotropię magnetyczną warstw można przeczytać w części IV, rozdziale 8, podrozdziale 8.3, podpodrozdziale 8.3.3. Ponadto rozdziały teoretyczne i doświadczalne przeplatają się nawzajem, co zapewne wynikało z dużej ilości różnych wyników i konieczności ich interpretacji przy pomocy różnych teorii. Język pracy jest w miarę poprawny, za wyjątkiem niektórych błędów stylistycznych które sprawiły, że tekst stał się niezrozumiały (patrz lista poniżej).

Poniżej przedstawiam listę najistotniejszych błędów i nieścisłości znalezionych przeze mnie w rozprawie:

1. Niejednorodność zapisu wzoru chemicznego badanego półprzewodnika. Doktorant stosuje naprzemiennie nazwy: GeMnTe , $\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ lub $(\text{Ge}, \text{Mn}) \text{Te}$.
2. Opisując efekty fizyczne które zamierza badać, doktorant często nie podaje odnośników literaturowych do prac oryginalnych, ale do prac wtórnych. Dotyczy to np. opisu anomalnego efektu Halla (odnośniki, 41, 42 i 43) i rezonansu ferromagnetycznego (odnośniki 80, 81, 82).
3. str. 5 – „Komórka elementarna” **nie** „składa się z dwóch podsieci kubicznych...”, ew. może się składać z 2 komórek.
4. str. 22 – rysunki 2.8 (a) i 2.8 (b) są zaczerpnięte z pracy Fukuma i in., umieszczonej pod odnośnikiem [15], a nie [16], jak to jest podane w podpisie.
5. str. 33 – Występuje tu niezrozumiałe zdanie, które jest zapewne żargonowym opisem widma rentgenowskiego: „Obecność dubletów związanych z liniami warstw Cu: $K_{\alpha 1}$ oraz $K_{\alpha 2}$ potwierdza obecność monokrystalicznej fazy romboedrycznej, której oś wzrostu znajduje się na diagonalu komórki elementarnej (kierunek [111])”. Zapewne chodzi o to, że szerokość linii dyfrakcyjnych od badanych warstw jest mniejsza od odległości pomiędzy liniami rentgenowskimi dubletu $K_{\alpha 1}$ i $K_{\alpha 2}$ Cu (Wynika z tego, że anoda lampy rentgenowskiej była wykonana z miedzi).
6. str 34 - podano, że cytowaną zależność liniową stałej sieci zaczerpnięto z pracy Fukuma i inni [28], a w rzeczywistości została ona opublikowana w innej pracy tej samej grupy [62].
7. str. 42 – Błędny (choć nieco zabawny) opis magnetometru SQUID-owego: „Urządzenie pomiarowe zbudowane jest z kriostatu wypełnionego ciekłym azotem, w którym znajduje się drugi kriostat wypełniony helem. W jego wnętrzu umiejscowiony

jest kontrkriostat połączony z kriostatem helowym za pomocą kapilary. Dodatkowo kriostat ten połączony jest z pompą zasysającą hel umożliwiając wykonywanie pomiarów w temperaturach do $T=1.5\text{ K}$...”

8. str. 45- błędne odwołanie do rysunku 7.3. Być może, powinno to być odwołanie do rysunku 7.2, ale nie widać tam zaznaczonego złącza Josephsona, o którym jest mowa w tekście. Inna możliwość to taka, że jakiś inny rysunek został usunięty w trakcie edycji rozprawy, a autor nie usunął odnośnika do niego.
9. str. 46 – wartość stałej Curie można wyznaczyć przez dopasowanie wzoru 7.1, a nie 7.2.
10. str. 48 i następne: Nazwisko Anthony’ego Arrotta pisze się przez dwa „t” na końcu.
11. str. 48 – na rysunku 7.4 (a) wartości strumienia telluru powinny być zamienione, aby zachować zgodność z kolejnością przedstawionych krzywych i legendą.
12. str. 81-83 – rysunki 8.8, 8.9 i 8.10. Schemat próbki naświetlanej laserem jest bardzo nieczytelny i niezrozumiałe jest znaczenie kątów obrotu. Nie wiadomo co tu jest kątem azymutalnym, a co wertykalnym.

Pomimo wysuniętych przeze mnie zastrzeżeń oraz zauważonych błędów i nieścisłości, stwierdzam, że mgr inż. Wojciech Knoff opracował technologię optymalizacji własności warstw $\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ wyhodowanych metodą MBE i scharakteryzował ich własności poprzez pomiary strukturalne i magnetyczne. W szczególności, przeprowadził istotne badania anizotropii magnetycznej warstw i opracował metody jej modyfikacji w warstwach $\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$. Wykazał się również niezbędną wiedzą teoretyczną i umiejętnością do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. A zatem w stopniu dostatecznym spełnił wymagania art. 13 „Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki”. Wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Wojciecha Knoffa do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

G. Gabecki