

Prof. dr hab. Czesław Kapusta
Katedra Fizyki Ciała Stałego
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica
Al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

22.11.2018.

**Opinia o rozprawie doktorskiej pana Rogera Kalviga
pod tytułem
„Lokalna struktura i własności magnetyczne epitaksjalnych warstw Mn_5Ge_3
domieszkowanych węglem”**

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska, której autorem jest pan Roger Kalvig, została zrealizowana w Oddziale Fizyki Magnetyzmu Instytutu Fizyki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie pod opieką, pani dr hab. Ewy Jędryki. Jej przedmiotem są badania cienkich epitaksjalnych warstw metalicznego ferromagnetyka Mn_5Ge_3 oraz jego formy domieszkowanej węglem metodą magnetycznego rezonansu jądrowego, wsparte obserwacjami rezonansu ferromagnetycznego i symulacjami mikromagnetycznymi. Badany materiał jest bardzo atrakcyjnym kandydatem do zastosowań między innymi w spintronice lub układach do zapisu informacji, a Oddział Fizyki Magnetyzmu posiada jedno z nielicznych na świecie laboratoriów prowadzących badania NMR materiałów magnetycznych, z wieloletnią tradycją i znaczącymi osiągnięciami w tej dziedzinie.

Rozprawa składa się z pięciu rozdziałów poprzedzonych streszczeniem w języku polskim i angielskim, a zakończona jest podsumowaniem i bibliografią liczącą 74 pozycje. Zawiera także trzy załączniki, z których pierwsze dwa przedstawiają wyprowadzenia wzorów, a trzeci zawiera listę publikacji i prezentacji konferencyjnych Autora. Całość mieści się na 97 stronach druku i jest zilustrowana 35 rysunkami i wykresami.

Rozdział pierwszy jest wprowadzeniem zawierającym wstęp, prezentację celu rozprawy oraz omówienie struktury i właściwości badanego materiału. W rozdziale

drugim przedstawione są główne techniki eksperymentalne zastosowane w badaniach, to jest magnetyczny rezonans jądrowy i rezonans ferromagnetyczny oraz używana w tych pomiarach aparatura. Rozdział trzeci zawiera opis przeprowadzonych badań rezonansu ferromagnetycznego i symulacji mikromagnetycznych oraz ich odniesienie do wyników pomiarów magnetometrycznych.

W rozdziale czwartym przedstawione są wyniki badań epitaksjalnych warstw Mn_5Ge_3 metodą magnetycznego rezonansu jądrowego ^{55}Mn bez zewnętrznego pola magnetycznego i w polu magnetycznym przykładanym równoległe, bądź prostopadłe do płaszczyzny warstwy. Uzyskane widma oraz odpowiadające im parametry nadształne, to jest pola nadształne i rozszczepienia kwadrupolowe, Autor jednoznacznie przyporządkował dwóm nierównoważnym miejscom manganu w strukturze krystalicznej. Z analizy zależności widm od grubości warstw oraz natężenia i kierunku przyłożonego pola magnetycznego określił również anizotropię tych wielkości, a także, co jest bardzo ważne dla poprawnej interpretacji wyników NMR w materiałach magnetycznych, kierunek momentów magnetycznych atomów dających wkład do danej linii widma. Przeanalizował także zależność widm i odpowiadających im parametrów nadształnych od kierunku namagnesowania, zmieniającego się z grubością warstw.

Rozdział piąty zawiera wyniki pomiarów ^{55}Mn NMR epitaksjalnych warstw materiału zawierającego węgiel, $Mn_5Ge_3C_{0.2}$, ich analizę i interpretację. W pomiarach bez zewnętrznego pola magnetycznego zaobserwowana została dodatkowa linia rezonansowa, w porównaniu do niedomieszkowanego materiału, która została przypisana miejscom manganu z atomami węgla w najbliższym otoczeniu. Badania zostały przeprowadzone także w polu magnetycznym przykładanym w płaszczyźnie warstwy, pod różnymi kątami w tej płaszczyźnie. Obserwowana ewolucja widma różni się znacznie pomiędzy linią Mn 6(g) posiadającego atom węgla jako najbliższego sąsiada, a linią manganu z takiego samego miejsca strukturalnego, ale bez węgla w najbliższym sąsiedztwie. Przeanalizowane zostały szczegółowo wartości pól

nadsubtelnych odpowiadających nierównoważnym miejscom strukturalnym oraz ich anizotropie.

W „Podsumowaniu” przedstawione są w syntetycznym ujęciu uzyskane wyniki oraz wynikające z nich wnioski. Z pomiarów NMR w polu prostopadłym do płaszczyzny warstwy Autor wysnuł wniosek, że w takim przypadku, jak i w pomiarach bez pola, sygnał pochodzi z obszarów z momentami magnetycznymi ułożonymi w kierunku łatwym, jak w domenie. Jest to ważne spostrzeżenie dla poprawnej interpretacji wyników, jako że w widmach NMR materiałów magnetycznych efekt wzmocnienia jest zwykle znacznie silniejszy dla ścian domenowych i sygnał z nich może dominować. Zaobserwowana i zmierzona anizotropia pól nadsubtelnych została przypisana anizotropii orbitalnego wkładu do momentu magnetycznego. Bardzo ważnym jest stwierdzenie, że węgiel obniża znacznie wartość i anizotropię pola nadsubtelnego pomiędzy osią, a płaszczyzną na miejscu manganu będącego jego najbliższym sąsiadem oraz likwiduje anizotropię w płaszczyźnie. Oznacza to obniżenie anizotropii momentu orbitalnego i jest konsyistentne z obserwowanym zmniejszeniem stałej anizotropii magnetokrystalicznej. Wyniki te stanowią bardzo dobre odniesienie dla obliczeń struktury elektronowej tych materiałów.

Tematem do dyskusji, czy ewentualnych przyszłych badań jest stwierdzenie (str.74), że „efektem obecności domieszki jest niejednorodne poszerzenie oddziaływania kwadrupolowego”. W przypadku, gdy widmo kwadrupolowe nie jest rozdzielone, często daje się zaobserwować oscylacje kwadrupolowe na krzywych zaniku echa spinowego, z których można wyznaczyć wartość rozszczepienia. Czy takie obserwacje były prowadzone, a jeżeli tak, to jaki był wynik?

Rozprawa jest napisana przejrzyście, z wyczerpującymi odniesieniami do literatury. Autor nie umieścił jednak w bibliografii swojej pracy opublikowanej w 2017 roku w *Journal of Physics D: Applied Physics*. Moim zdaniem powinna ona być zacytowana, jako że dotyczy bezpośrednio tematu rozprawy. Nie ustrzegł się też przed kilkoma drobnymi błędami, np.: symbol μ jest użyty na oznaczenie $\cos\theta$ na str.11 i momentu magnetycznego w równaniu (2.1), rys.1.2 przedstawiający

dyfraktogram opisany jest jako widmo, a w kilku miejscach zamiast „krzywe namagnesowania” powinno być „krzywe magnesowania”, czy zamiast „częstotliwość” – „częstość kołowa”. Na rys.3.10 stała anizotropii ma znacząco różną od zera wartość przy T_C , co wymaga wyjaśnienia.

Wyniki przedstawione w rozprawie pokazują, że Autorowi udało się zbadać i określić szczegółowo parametry nadsubtelne manganu w epitaksjalnych warstwach Mn_5Ge_3 oraz ich anizotropię i wpływ węgla wprowadzonego do struktury na te parametry. Wyniki te są również przedmiotem dwóch prac, które opublikował w renomowanych czasopismach naukowych o zasięgu międzynarodowym: Journal of Physics D; Applied Physics i Physical Review B. Rezultaty swoich badań prezentował także na ośmiu konferencjach, głównie międzynarodowych, gdzie trzy z prezentacji były wystąpieniami ustnymi.

Rozprawa prezentuje wysoki poziom merytoryczny, a przedstawione w niej wyniki stanowią ważny krok w badaniach cienkowarstwowych materiałów magnetycznych dla spintroniki i zapisu informacji oraz w rozwoju metodologii NMR w odniesieniu do takich materiałów. Podsumowując stwierdzam, że spełnia ona ustawowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie jej Autora, pana Rogera Kalviga do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Biorąc dodatkowo pod uwagę również fakt opublikowania wyników przedstawionych w rozprawie badań w dwóch renomowanych czasopismach naukowych o międzynarodowym zasięgu, składam wniosek o jej wyróżnienie.

