

Dr hab. Ryszard Gieniusz, prof. UwB.
Wydział Fizyki
Uniwersytetu w Białymstoku

Recenzja rozprawy doktorskiej mgra Oleksandra Chumaka, pt. **” Magnetoelastic properties, magnetic anisotropy and magnetic damping of Co₂YZ Heusler alloy thin films”**

Ograniczenia konwencjonalnej technologii przekazywania informacji poprzez ruch ładunków, takie jak niewielkie prędkości, duże zużycie energii czy bariera w miniaturyzacji, zmuszają badaczy do poszukiwania sposobu zastąpienia elektronu innymi kwazicząstkami takimi jak np. magnony. Cienkie warstwy magnetyczne aby mogły spełnić warunki zastosowania w spintronice i układach magnonicznych powinny w pierwszej kolejności charakteryzować się niewielkim tłumieniem magnetycznym. Spośród wielu ferromagnetyków, cienkie warstwy stopów Heuslera bazujące na Co₂ wydają się być bardzo dobrym kandydatem, do zastąpienia pamięci komputerowych bazujących na półprzewodnikach.

Cienkie warstwy stopów Heuslera bazujące na Co₂ charakteryzują się między innymi wysoką polaryzacją spinową, wysoką temperaturą Curie oraz niewielkimi tłumieniem magnetycznym. Wybór tej interesującej grupy materiałów jako przedmiotu badań w recenzowanej pracy doktorskiej jest więc trafny i w pełni uzasadniony.

Celem rozprawy doktorskiej mgra Oleksandra Chumaka było wyjaśnienie i zbadanie związku własności magnetosprężystych, anizotropii magnetycznej oraz procesów tłumienia magnetycznego, wybranej grupy cienkich warstw stopów Heuslera bazujących na Co₂, Co₂Fe_xMn_{1-x}Si, Co₂Fe_{0.4}Mn_{0.6}Si oraz Co₂FeGa_{0.5}Ge_{0.5} o różnej grubości i osadzanych z wykorzystaniem różnych warstw buforowych oraz powierzchniowych.

W celu realizacji tak postanowionego trudnego celu, mgr Chumak wykonał szereg podstawowych, uzupełniających się pomiarów, na trzech układach spektrometrów rezonansu ferromagnetycznego (FMR) wykorzystujących: (i) wnęką rezonansową na pasmo X, badania wykonał w szerokim zakresie temperatur od helowej do pokojowej, (ii) wektorowy analizator obwodów (VNA-FMR) umożliwiający pomiary wzbudzeń w szeroki zakres częstotliwości od 2 do 20 GHz, (iii) modulacją naprężeń (SM-FMR), ten unikatowy, zbudowany w IFPAN, układ pozwalał na wyznaczenie anizotropii indukowanej naprężeniami i magnetostrykcji. Eksperymenty te, stanowiące zasadniczą część pracy, mgr Chumak uzupełnił pomiarami magnetometrycznymi z wykorzystaniem magnetometru SQUID oraz strukturalnymi z zastosowaniem dyfraktometru promieni X.

Dorobek naukowy doktoranta stanowi jedenaście publikacji w czasopismach: Scientific Reports 2019, Low Temp. Phys. 2019, Acta Phys. Pol. A, 2019, J. Magn. Magn. Mater. 2018, 22nd International Microwave and Radar Conference (MIKON) 2018, J. Alloy. Compd. 2018, J. Appl. Phys. 2017, IEEE Trans. Magn. 2017, Low Temp. Phys. 2017, J. Low. Temp. Phys. 2015, Acta Phys. Pol. A 2014, czterech ustnych wystąpień konferencyjnych oraz dwóch wystąpień plakatowych.

Recenzowana rozprawa doktorska jest napisana w języku angielskim i składa się z sześciu rozdziałów, z których cztery pierwsze są wprowadzeniem dotyczącym własności, sposobów wytwarzania stopów Heuslera oraz zjawisku magnetosprężystości. W rozdziale piątym Autor

zapoznaje czytelnika z technikami eksperymentalnymi które wykorzystał do przeprowadzenia badań. W rozdziale szóstym Doktorant przedstawił wyniki badań, w funkcji grubości próbek, składu oraz temperatury, namagnesowania nasycenia, anizotropii magnetycznej, właściwości magnetosprężystych oraz tłumienia magnetycznego. W rozdziale szóstym Autor podjął również próbę określenia korelacji pomiędzy badanymi wielkościami fizycznymi.

Kolejne etapy pracy obejmowały:

(i) Wykonanie pomiarów magnetometrem SQUID i wyznaczenie namagnesowania nasycenia w zakresie temperatur od helowej do pokojowej wszystkich badanych warstw magnetycznych,

(ii) Wykonanie pomiarów FMR w paśmie X, w dwóch konfiguracjach pól magnetycznych, prostopadłego oraz równoległego do powierzchni próbki, w zakresie temperatur od helowej do pokojowej,

(iii) Wyznaczenie z pomiarów FMR i SQUID stałych anizotropii magnetycznej.

- a) We wszystkich badanych próbkach stwierdzono ujemną wartość stałej anizotropii magnetokrystalicznej (kierunek łatwy magnetyzacji leży w płaszczyźnie warstwy).
- b) W przypadku próbek $\text{Co}_2\text{Fe}_x\text{Mn}_{1-x}\text{Si}$ o różnej zawartości x stwierdzono słabą zależność temperaturową stałej anizotropii magnetycznej, która zmieniała się w zakresie od -2×10^6 do -1×10^6 erg/cm³
- c) W warstwach $\text{Co}_2\text{Fe}_{0.4}\text{Mn}_{0.6}\text{Si}$ oraz $\text{Co}_2\text{FeGa}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$ stwierdzono zmniejszanie się bezwzględnej wartości stałej anizotropii wraz ze wzrostem grubości warstw magnetycznych. Temperaturowa zależność stałej anizotropii okazała się bardzo słaba. W obu seriach próbek stwierdzono tendencję do zmniejszania anizotropii po zastosowaniu dodatkowego bufora Ag, dla układów CFMS jest to wartość 2.5×10^5 erg/cm³ (próbka o grubości 30nm) oraz 8×10^5 erg/cm³ (próbki o grubości 50nm). W układach CFGG wartości te, dla grubości 30nm oraz 50nm, są odpowiednio, 8×10^5 erg/cm³ oraz 6×10^5 erg/cm³. W badanych seriach próbek oszacowano również anizotropię powierzchniową, która okazała się być ujemna -0.77 erg/cm² dla układów CFMS oraz dodatnia około 0.11 erg/cm² dla układów CFGG.

(iv) Zbadanie właściwości magnetosprężystych metodą rezonansu ferromagnetycznego z modulacją naprężeń (SM-FMR) w temperaturze pokojowej. Magnetosprężyste własności badanych próbek okazały się względnie słabe. Dla wszystkich serii próbek stwierdzono, że bezwzględne wartości stałych magnetosprężystych zmniejszają się ze zmniejszaniem grubości warstw magnetycznych. Indukowana naprężeniem stała anizotropii magnetycznej okazała się mieć wartość dodatnią i co do bezwzględnej wartości jest mniejsza od stałej anizotropii magnetokrystalicznej. W przypadku obu serii próbek CFMS oraz CFGG stwierdzono, że efekty magnetosprężyste są słabsze niż w materiale objętościowym.

- a) Dla układów $\text{Co}_2\text{Fe}_x\text{Mn}_{1-x}\text{Si}$ stwierdzono korelację wielkości stałej magnetosprężystej z wielkością namagnesowania nasycenia.
- b) Dla układów CFMS oraz CFGG stwierdzono podobne co do rzędu wielkości wartości stałych magnetosprężystych jak w układzie $\text{Co}_2\text{Fe}_x\text{Mn}_{1-x}\text{Si}$.

(v) Wykonanie pomiarów S_{ij} parametrów, szerokopasmowym spektrometrem VNA-FMR z użyciem paskowej linii.

a) Z pomiarów tych wyznaczono szerokości połówkowe ΔH w zakresie częstości od 3 do 20 GHz.

b) Z $\Delta H(f)$ wyznaczono składową rozproszenia dwu-magnonowego oraz współczynnik efektywnego tłumienia, który okazał się silnie zależny od składu oraz zastosowanych buforów i przykrycia badanych próbek. Jednak trudno było znaleźć prostą korelację pomiędzy stałą tłumienia Gilberta oraz stałymi magnetosprężystymi, np. dla serii $CF_xM_{1-x}S$ przy zmianie x (Rys. 6.17), chociaż wcześniej stwierdzono dla tej serii korelację pomiędzy zmianami własnościami magnetosprężystych ze zmianami namagnesowania.

Stwierdzono, że zastosowanie odpowiedniej struktury warstwy bufora może zredukować parametr tłumienia kilkanaście razy.

Dla serii CFGG z przykryciem Ta stwierdzono odwrotną zależność parametru tłumienia od grubości warstwy (rys. 6.18). Ze wzrostem grubości we wszystkich badanych próbkach zaobserwowano wzrost bezwzględnej wartości stałej magnetosprężystej B_{11} .

Stwierdzono też, że we wszystkich badaniach warstwach, w których można pominąć efekt pompowania spinów, zaobserwowano korelację wzrostu tłumienia magnetycznego ze wzrostem bezwzględnej wartości stałej magnetosprężystej (Rys. 6.19). Takie efekty nie były dotychczas obserwowane i są to, moim zdaniem, najciekawsze i najważniejsze wyniki recenzowanej rozprawy.

Recenzowana rozprawa doktorska napisana została poprawnie stylistycznie i z klarowną strukturą poszczególnych części pracy.

Podsumowanie

Uwaga odnośnie prezentacji wyników, w przypadku pomiarów FMR na pasmo X, podane jest jedno widmo FMR dla pól prostopadłego i równoległego do warstwy z widocznym rozszczepieniem widma dla konfiguracji pola prostopadłego. A właśnie z tego widma Autor wyliczał stałe anizotropii magnetycznej. Brak jest dyskusji wpływu takiej postaci widma na wyliczone stałe anizotropii.

Wydaje się też, że do znalezienia korelacji pomiędzy analizowanymi wielkościami oraz interpretacji wyników przydatne byłoby wykonanie obliczeń np. modelami analitycznymi lub z użycie narzędzi symulacji mikromagnetycznych.

Uwagi te nie umniejszają jednak wartości recenzowanej pracy, której głównym osiągnięciem jest wykazanie w wybranych stopach Heuslera, korelacji zmian bezwzględnej wartości stałych magnetosprężystych ze zmianami tłumienia magnetycznego oraz grubości warstwy magnetycznej. Pomimo, że mierzone efekty fizyczne są bardzo słabe, w szczególności stałe magnetosprężyste, zaprezentowane w rozprawie wyniki pokazały wysokie umiejętności Autora jako eksperymentatora oraz jego wnikliwą wiedzę w ich interpretacji. Wysoko należy ocenić dorobek naukowy mgra Chumaka, w latach 2014-2019 opublikował 3 prace bezpośrednio związane z tematyką dysertacji oraz 8 nie związanych z pracą doktorską.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgra O. Chumaka spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim z fizyki i wnioskuję o dalsze procedowanie przewodu doktorskiego autora rozprawy.

Białystok, 2020.01.12

