

Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

Katedra Elektroniki

e-mail:stobieck@agh.edu.pl

## Recenzja

pracy doktorskiej mgra Marcina Sikory

### Własności magnetyczne i elektronowe związków $Gd_{0.4}Tb_{0.6}(Co_{1-x}M_x)_2$ , $M = Ni, Fe, Al, Si$

Promotor: prof. dr hab. Grażyna Chełkowska Uniwersytet Śląski Wydział Nauk Ścisłych i Technicznych  
Instytut Fizyki im. Augusta Chełkowskiego

Promotor pomocniczy: dr Jerzy Kubacki Uniwersytet Śląski Wydział Nauk Ścisłych i Technicznych  
Instytut Fizyki im. Augusta Chełkowskiego

### Wybór tematu i cel pracy

Praca doktorska mgra Marcina Sikory dyskutuje wyniki badań międzymetalicznych faz Lavesa  $RT_2$  ziemia rzadka (R) metal przejściowy (T) i  $RM_2$  ziemia rzadka metal z bloku p. Z punktu widzenia strukturalnego są to bardzo ważne związki faz międzymetalicznych gdyż tworzą wysoko uporządkowane atomowo stopy: ferromagnetyczne na bazie pierwiastków ziem rzadkich (np.  $GdCo_2$ ,  $TbFe_2$ ), antyferromagnetyczne (np.  $TbMn_2$ ), nadprzewodzące (np.  $CeRh_2$ ,  $ZrZn_2$ ), jak również magnetyczne typu  $RT_2$  wykazujące duży efekt magnetokaloryczny (dyskutowany w tej pracy).

Silne oddziaływania spinowo-orbitalne związków  $RT_2$  sugerują, badaczom poszukującym nowych materiałów spintronicznych o wysokiej wydajności generowania prądów spinowych i nisko tłumiennej dynamice, zastosowanie faz Lavesa typu  $RT_2$ . Na przykład, w niedawno opublikowanej teoretycznej pracy *First-Principles Prediction of Skyrmionic Phase Behavior in  $GdFe_2$  Films Capped by 4d and 5d Transition Metals* Soyoung Jekal et al. *Applied Sciences*. **9**, 630 (2019), autorzy stosując metody dynamiki spinowej w rozwiązaniu równania LLG (Landau–Lifshitz–Gilbert) identyfikują fazę skyrmionową dla cienkich warstw  $GdFe_2$  pokrytych cienką warstwą metalu 4d lub 5d.

Historia związków między metalicznych  $RT_2$  i  $RM_2$  w różnym stopniu domieszkowanych sięga lat 50. ubiegłego stulecia i ma ciągle, co pokazał doktorant na rys. 1 wykładniczo rosnący charakter. Tradycja badań związków międzymetalicznych w Instytucie Fizyki UŚ (IF UŚ) sięga końca lat 80. ubiegłego wieku, znaczącą pozycję w tych badaniach ma zespół prof. Grażyny Chełkowskiej. Opublikowane prace dotyczą domieszkowanych stopów międzymetalicznych  $RT_x$ , w których dyskutowane są między innymi zagadnienia: własności magnetycznych, termoelektrycznych oraz struktury elektronowej.

Praca doktorska mgra Marcina Sikory jest bardzo obszerna, liczy aż 247 stron łącznie z aneksem. Tak ogromna objętość pracy spowodowana jest jej wielowątkowym charakterem, w mojej opinii zawiera materiał na co najmniej kilka prac doktorskich. Doktorant bada uporządkowanie

strukturalne (przeprowadza analizę fazową oraz wyznacza parametry sieciowe) wytworzonych stopów i w szerokim zakresie temperatur (od 2K do 400K) bada ich własności magnetyczne, przewodnictwo elektryczne, zmiany entropii magnetycznej. Dodatkowo bada strukturę elektronową oraz wpływ rozmiaru cząstek w procesie rozdrabniania na ich własności magnetyczne.

Trzeba przyznać, że wyniki pomiarów są nowatorskie, fizycznie interesujące i zostały starannie opracowane, jednak ich analiza i dyskusja są raczej powierzchowne i ograniczone do interpretacji w oparciu o powszechnie znane modele fenomenologiczne. Recenzentowi trudno znaleźć motyw przewodni badań - istotny z punktu widzenia stanu wiedzy w tej tematyce - uzasadniający zastosowanie tak szerokiego spektrum metod badawczych. Ponadto doktorant przeprowadził badania na dwóch odrębnych grupach domieszkowanych związków  $RT_2$  i  $RM_2$  czego nie uzasadnił, niepotrzebnie zwiększając objętość pracy. Tak duża różnorodność tematyczna, w mojej opinii, była z pewnością powodem trudności w sformułowaniu przez doktoranta uniwersalnego celu badań.

Mgr Marcin Sikora w rozdziale 1. *Wstęp i motywacja* starannie przedstawia stan wiedzy w tematyce domieszkowanych binarnych  $RT_2$  i pseudo binarnych związków  $R_{1-x}R'_x(T_{1-y}T'_y)_2$  i uzasadnia aktualność kontynuacji badań szczególnie w kierunku wyjaśnienia dużych zmian entropii magnetycznej (to ważny aspekt aplikacyjny badań nad materiałami na wysokowydajne chłodziarki magnetyczne), zauważa również brak szczegółowych badań struktury elektronowej tych związków z wykorzystaniem metod XPS (X-ray Photoelectron Spectroscopy). Niestety czytelnik, nie znajdzie w tym rozdziale uzasadnienia dla badań pseudo binarnych stopów  $R_{1-x}R'_x(M_{1-y}=Al, Si)_2$ .

Doktorant ostatecznie formułuje w rozdziale 2. *Cele pracy* sześć zadań badawczych, które nie łączą się w jeden uniwersalny cel/tezę, który/którą zamierza osiągnąć/udowodnić (do sformułowania celów jakie zamierza osiągnąć używa takich określeń jak: „opracowanie, zbadanie”, które to słowa do określenia celu naukowego badań nie są właściwe).

Aby zrealizować zaplanowane zadania badawcze Marcin Sikora opanował wiele technik preparacyjnych i pomiarowych, do tych bardziej zaawansowanych zaliczyłbym pomiary struktury elektronowej metodą XPS, temperaturowe pomiary magnetyczne, termomagnetyczne i entropii magnetycznej magnetometrem SQUID (Superconducting Quantum Interference Device), pomiary oporu elektrycznego z zastosowaniem wielofunkcyjnego przyrządu PPMS (Physical Property Measurement System).

Podsumowując ocenę raczej zadań niż celów badawczych rozprawy doktorskiej mgra Marcina Sikory pragnę podkreślić, że tematyka oraz zastosowanie zaawansowanych metod wytwarzania i charakteryzacji próbek są naukowo aktualne w problematyce litych stopów magnetycznych o strukturze faz Lavesa.

## **Treść pracy i uwagi szczegółowe**

Rozprawa doktorska mgra Marcina Sikory napisana jest w języku polskim i liczy, jak już wspomniałem wyżej, 234 strony, ma tradycyjny układ i została podzielona na 8 rozdziałów podstawowych, kolejno dzielonych na liczne podrozdziały, 9. rozdział to aneks, w którym autor załącza dodatkowe pomiary magnetyczne związku  $Gd_{0.4}Tb_{0.6}(Co_{1-x}Ni_x)_2$ .

Ponieważ do motywacji badań i celów rozprawy doktorskiej już się ustosunkowałem, przejdę do dyskusji nad treścią kolejnych rozdziałów. Rozdział 3. *Przegląd danych literaturowych* został dobrze opracowany, ale jest zbyt obszerny a diskutowane w nim modele teoretyczne tylko częściowo doktorant wykorzystuje do analizy swoich pomiarów. Przykładem jest podrozdział 3.2 zatytułowany *Własności magnetyczne układów  $RT_2$* , w którym doktorant omawia oddziaływania wymienne typu RKKY (tytuł rozdziału nie odpowiada treści w nim zawartych) ale całki wymiany podsięci  $J_{RR}$ ,  $J_{RT}$  oraz  $J_{TT}$  badanych próbek wyznacza w przybliżeniu średniego pola (MFT) opisanego w oddzielnym podrozdziale 3.3.2 *Model średniego pola (MFT)*, nie odnosząc się w podrozdziale 6.6.3. omawiającym *Własności magnetyczne układów  $Gd_{0.4}Tb_{0.6}(Co_{1-x}M_x)_2$* , do modelu oddziaływań wymiennych typu RKKY. Niektóre rozdziały przeglądu literaturowego mgr M. Sikora, oprócz teorii, jak na przykład 3.3.3. *Zmiany entropii magnetycznej – efekt magnetokaloryczny* wzbogaca przykładami stopów  $RT_2$ , ale wyniki dotychczas opublikowane przez innych omawia w oddzielnym rozdziale 3.4. *Własności magnetyczne wybranych związków  $RCo_2$* , który to rozdział powinien być nazwany „*Własności.... związków  $RT_2$* ” gdyż doktorant omawia w nim również związki  $RNi_2$ .

Podstawy teoretyczne pomiarów XPS z odwołaniem do najważniejszych prac związków  $RT_2$  i  $RM_2$  doktorant opisał w podrozdziale 3.5 *Struktura elektronowa związków  $RT_2$*  (powinno być i  $RM_2$ ), który w mojej opinii jest wyczerpująco zredagowanym podrozdziałem rozdziału 3. *Przegląd danych literaturowych*.

Z kolei rozdział 3.6 *Opór elektryczny związków  $RT_2$*  - choć z tytułu wynika, że autor ustosunkuje się do opublikowanych wcześniej przez innych badaczy wyników zależności temperaturowych oporu stopów  $RT_2$  - jednak nie znajdujemy takiego omówienia w tym rozdziale, jedynie opis klasycznych modeli przewodnictwa elektrycznego dla metali ferromagnetycznych.

Rozdział 4. *Techniki pomiarowe*, pozwala czytelnikowi zorientować się jakie metody doktorant stosował, nie mniej informacje na ten temat powinny być ograniczone do koniecznych, istotnie związanych z przedmiotem badań pracy doktorskiej. Na przykład opisy działania: złącza SQUID, skaningowego mikroskopu elektronowego, aparatury PPMS są zbędne gdyż niepotrzebnie zwiększają objętość pracy a dla zainteresowanych są łatwe do znalezienia na przykład w internecie.

Rozdział 6. *Wyniki eksperymentalne* doktorant podzielił na 5 podrozdziałów dotyczących: 6.1. *Struktury krystalicznej*, 6.2. *Struktury elektronowej*, 6.3. *Własności magnetycznych*, 6.4 *Własności oporowe*, 6.5. *Wpływ rozmiarowości*. Z kolei każdy z tych pięciu podrozdziałów wyników eksperymentalnych został dalej podzielony na podrozdziały omawiające dane pomiarowe wszystkich rodzajów próbek przez niego wytworzonych, który to materiał liczy aż 131 stron plus 11 stron aneksu.

Doktorant bardzo skrupulatnie opracował dane strukturalne wszystkich związków analizowanych w doktoracie, wyznaczył parametry sieciowe komórek elementarnych, określił odstępstwa od jednorodności fazowej w zależności od stopnia domieszkania. Wszystkie wyniki opracował w postaci starannie dopasowanych dyfraktogramów i szczegółowych tabel. Szkoda, że nie zrobił podsumowania i nie wyciągnął ogólnych wniosków z badań strukturalnych w powiązaniu do technologii wytwarzania próbki, takie podsumowanie znacznie poprawiłoby czytelność pracy.

Badania struktury elektronowej opisane podrozdziale 6.2. *Struktura elektronowa związków  $Gd_{0.4}Tb_{0.6}(Co_{1-x}M_x)_2$*  doktorant opracował bardzo starannie, a co najważniejsze podsumował i wyciągnął interesujące fizycznie wnioski z pomiarów XPS. Do najważniejszych Jego zdaniem należą:

- brak zmian w kształtach i położeniach energetycznych linii rdzeniowych atomów Co, Ni i linii rdzeniowych atomów ziem rzadkich Tb i Gd, na skutek podstawiania Co atomami: Ni, Fe, Si i Al,
- wyznaczenie, na podstawie analizy położenia linii podstawowej i linii satelitarnej 3s Co, momentów magnetycznych Co w funkcji zawartości Ni i Al, otrzymane wartości są zgodne z wyznaczonymi z pomiarów namagnesowania.

Proszę o wyjaśnienie i interpretacje, przez doktoranta podczas obrony, zmian w paśmie walencyjnym na skutek podstawiania Co atomami Ni (rys. 42 i 43) i Al (rys. 64 i 65). Czy widoczne na podanych rysunkach zmiany można ilościowo interpretować?

Rozdział 6.3. *Własności magnetyczne układów  $Gd_{0.4}Tb_{0.6}(Co_{1-x}M_x)_2$*  to najważniejszy zbiór pomiarów magnetycznych wszystkich próbek. Doktorant za pomocą magnetometru SQUID przeprowadza pomiary zmian magnetyzacji w funkcji temperatury  $M=M(T)$  w zakresie od 2K do 400K przy ustalonych wartościach zewnętrznego pola, pętle histerezy  $M=M(H)$ , krzywe Arrotta. Dodatkowo celem precyzyjnego wyznaczenia temperatury Curie wykonuje temperaturowe pomiary zmienno-prądowej podatności  $\chi^{AC} = \chi^{AC}(T)$  oraz pomiary zmian entropii magnetycznej w funkcji temperatury i pola magnetycznego.

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów opisanych w podrozdziale 6.3.1. *Własności magnetyczne związków  $Gd_{0.4}Tb_{0.6}(Co_{1-x}Ni_x)_2$* , ( $x = 0.00, 0.05, 0.15, 0.50, 0.80, 1$ ) doktorant wyznacza, posługując się prawem Curie-Weissa, w szerokim zakresie zmian domieszkowania Ni temperaturę Curie, paramagnetyczną temperaturę ( $\theta_p$ ) i moment efektywny próbki ( $\mu$ ). Z pomiarów  $M(H)$  w  $T=2K$  wyznacza namagnesowanie próbki i namagnesowanie podsięci metalu przejściowego, zakładając na podstawie literatury moment magnetyczny podsięci ziemi rzadkiej równy  $8.2\mu_B$ , a w oparciu o model pola średniego (MFT) wyznacza całki wymiany ( $J_{RR}, J_{RT}, J_{TT}$ ). Autor rozprawy otrzymuje bardzo ciekawy wynik odnośnie intensywności oddziaływań wymiennych między podsięciami w funkcji zmiany zawartości Ni w stopie. Doktorant pokazał, że zastosowany model MFT dla skrajnych koncentracji Ni  $x=0.05, x=0.10, x=0.80$  i  $x=1$  ma ograniczone zastosowanie - dlaczego? (podobne zachowanie uzyskał dla szeregu Al - proszę o komentarz podczas rozprawy).

Podobną analizę doktorant przeprowadza dla stopów ze zmienną zawartością Si  $Gd_{0.4}Tb_{0.6}(Co_{1-x}Si_x)_2$  ( $x = 0.00, 0.05, 0.10$ , podrozdział 6.3.2) i Al  $Gd_{0.4}Tb_{0.6}(Co_{1-x}Al_x)_2$  ( $x = 0.00, 0.05, 0.15, 0.80, 1$ , podrozdział 6.3.3.), analizuje też stop  $Gd_{0.4}Tb_{0.6}(Co_{0.95}Fe_{0.05})_2$ , są to jedyne wyniki ilościowe uzyskane z analizy pomiarów magnetycznych. Szkoda, że doktorant nie przeprowadza ilościowej analizy krzywych termomagnetycznych FC/ZFC i wykresów Arrotta, które niosą informacje dotyczącą zmian wykładników krytycznych w otoczeniu przejścia fazowego ferromagnetyk/paramagnetyk.

Interesujące pomiary zmian entropii w otoczeniu temperatury Curie doktorant przeprowadza dla wszystkich próbek wytworzonych, pokazał że maksymalne zmiany entropii występują dla próbek wykazujących niską temperaturę Curie (dla  $Gd_{0.4}Tb_{0.6}Ni_2$  i  $Gd_{0.4}Tb_{0.6}Al_2$  zmiana entropii sięga wartości  $-\Delta S=15J/kgK$ ).

Zależności oporu właściwego w funkcji temperatury w zakresie 4K – 400K autor rozprawy doktorskiej zmierzył tylko na próbkach  $Gd_{0.4}Tb_{0.6}(Co_{1-x}Ni_x)_2$  i  $Gd_{0.4}Tb_{0.6}(Co_{1-x}Al_x)_2$ , gdyż próbki z domieszką Si się kruszyły. Doktorant oszacował, z zależności zmierzonych poniżej temperatury  $T_C$ ,

wkłady pochodzące od poszczególnych mechanizmów rozpraszania: fononowego, rozpraszania typu  $s-d$ , rozpraszania elektron – elektron posługując się regułą Matthiessena. Pokazał, że model, który zastosował dobrze pracuje dla stopów niklowych w całym zakresie zmian koncentracji Ni, natomiast dla stopów z Al tylko w dwóch przypadkach  $x=0.05$  i  $x=1$  dał się zastosować – dlaczego? (proszę komentarz podczas rozprawy). Z zależności temperaturowych oporu wyznaczył temperaturę Curie i uzyskał bardzo dobrą zgodność z tymi wyznaczonymi z temperaturowych pomiarów namagnesowania.

W tym miejscu warto zwrócić uwagę, że doktorant mógł przeprowadzić analizę zmian pochodnej oporności właściwej po temperaturze w otoczeniu  $T_c$ , na przykład korzystając z recepty podanej w pracy L. W. Shacklette *Phys. Rev. B*, **9** 3789 (1974), *Specific heat and resistivity of iron near its Curie point*, badając wykładnik krytyczny przejścia fazowego ferromagnetyk/paramagnetyk oporności właściwej, a następnie ustosunkować się do otrzymanych wykładników krytycznych z analizy pomiarów temperaturowych magnetyzacji.

Pozwolę sobie na szerszy komentarz odnośnie nie wykorzystania przez doktoranta bardzo systematycznych pomiarów temperaturowych magnetyzacji i podatności. Wiemy, że analiza zachowania krytycznego dostarcza istotnych informacji na temat termodynamiki ciągłego przejścia od stanu ferromagnetycznego (FM) do paramagnetycznego (PM). W pobliżu przejścia FM/PM drugiego rodzaju obowiązują uniwersalne prawa skalowania dla spontanicznego namagnesowania ( $M_s$ ) i początkowej podatności magnetycznej ( $\chi_0$ ) z powodu silnych zmian charakterystycznych długości korelacji oddziaływań wymiennych. Mianowicie  $M_s$  tuż poniżej temperatury Curie ( $T_c$ ) opisuje relacja  $M_s \sim (1-T/T_c)^\beta$ , a  $\chi_0$  tuż powyżej  $T_c$  spełnia relację  $1/\chi_0 \sim (T/T_c - 1)^\gamma$  a krytyczna izoterma w punkcie  $T=T_c$   $M(H)$  opisana jest za pomocą funkcji  $M(H) \sim H^{1/\delta}$ . Trzy krytyczne wykładniki spełniają relację skalowania  $\delta=1+\gamma/\beta$ . Krytyczne wykładniki, uzyskane w wielu różnych systemach materiałów FM, można pogrupować w kilka dobrze znanych klas uniwersalnych, takich jak model pola średniego (MFT):  $\beta=0.5$ ,  $\gamma=1.0$ ,  $\delta=3.0$ , model 3D Heisenberga:  $\beta=0.365$ ,  $\gamma=1.386$ ,  $\delta=4.80$  oraz model 3D Isinga:  $\beta=0.325$ ,  $\gamma=1.241$ ,  $\delta=4.82$ . Niezwykłe zachowania krytyczne, charakteryzujące się wykładnikami krytycznymi spoza oczekiwanych zakresów klas uniwersalnych, kwestionują teorię skalowania zjawisk krytycznych i tym samym są bardzo interesujące do zbadania różnych związków międzymetalicznych, a moim zdaniem, również stopów z fazami Lavesa.

Włączenie przez mgr Marcina Sikorę wyników opisanych w rozdziale 5 *Wpływ rozmiarowości na własności fizyczne związku  $Gd_{0.4}Tb_{0.6}(Co_{0.90}Ni_{0.10})_2$*  było ciekawym krokiem w dobrym kierunku, gdyż jak się należało spodziewać rozdrobnienie na małe ziarna próbki wcześniej dobrze wykryształizowanej, dzięki takiemu zabiegowi istotnie wpływa na zmianę charakterystycznych długości korelacji oddziaływań wymiennych, a w konsekwencji na bardzo istotną zmianę zachowań w otoczeniu  $T_c$ . W mojej ocenie analiza wyników na próbce rozdrobnionej do różnej wielkości cząsteczek nie została opracowana w interesującym z punktu widzenia fizyki kierunku. W konsekwencji 16 stron tego zagadnienia zwiększyło tylko objętość pracy doktorskiej.

Rozprawę doktorską kończy rozdział 7. *Podsumowanie zbiorcze badań, analiza oraz wnioski*, który w mojej opinii jest za obszerny, gdyż z jednej strony autor rozprawy powtarza wnioski wcześniej sformułowane, a z drugiej formułuje nowe, a w takiej sytuacji recenzent traci kontrolę nad logicznym wnioskowaniem doktoranta. Ostatecznie, na szczęście formułuje w 16. punktach wnioski ogólne, które podsumowują prawidłowo najważniejsze rezultaty badań.

Do zalet opracowania rozprawy doktorskiej należy zaliczyć bardzo staranną szatę graficzną, wszystkie pomiary są opatrzone prawidłową oceną błędu, autor rozprawy jest dobrze zorientowany w problematyce stopów międzymetalicznych na bazie ziem rzadkich z metalami przejściowymi, czego dowodem są starannie dobrane referencje, cytowane są najważniejsze publikacje z tej tematyki, łącznie 100 prac. Choć autor rozprawy starał się być staranny w redakcji pracy, nie uniknął następujących błędów redakcyjnych oraz niezręcznych sformułowań fizycznych:

- po tytule nie stawiamy kropki, co autor stosuje konsekwentnie w całej pracy,
- niekonwencjonalny zapis numeracji wzorów/równań (numer stawia przed równaniem),
- str. 21 dziwny tytuł rozdziału 3.3. *Fizyczne aspekty układów magnetycznych*, który nie odpowiada treści rozdziału ani właściwego użycia słowa aspekt (punkt widzenia),
- str. 33 podpis pod Rys. 8. *Własności magnetyczne  $Gd(Co_{1-x}Ni_x)_2$  [47]* jest zbyt ogólny, niekompletny i nieprecyzyjny, są na odrębnych rysunkach 3 własności: stała sieciowa  $a$ ,  $M$ ,  $\Delta S_M$  co należało w podpisie zaznaczyć,
- str. 37, Rys. 13 podobnie, podpis niekompletny,
- str. 39, podrozdział 3.5. *Struktura elektronowa związków  $RT_2$* , doktorant pisze: „*W ramach modelu s – d, który został przedstawiony w poprzednim podrozdziale, struktura elektronowa tych związków ukryta jest w parametrach  $b_i$  oraz  $c_i$ .*” Nie znalazłem „w poprzednim podrozdziale” modelu s-d ani parametrów  $b_i$  oraz  $c_i$ ,
- str. 45, treść zdania niezrozumiała, zostały opuszczone wyrazy: „*Silnie zależy on od temperatury, gdyż wraz ze jej obserwuje się zwiększanie amplitudy drgań sieci krystalicznej.*”
- str. 48, nie rozumiem co na myśli ma autor?, jaka według niego jest różnica między dyfraktogramem a widmem pomiarowym – proszę o wyjaśnienie,
- str. 65 nie „diuar” ale w j. ang. dewar, słowo stosowane w żargonie kriogeniców oznacza po polsku kriostat, a nazwa pochodzi od nazwiska wynalazcy naczyń na ciekły azot pana Dewar’a,
- str. 72 „literówka” zanik eksponenty, wzór (95) źle zapisany,
- str. 93 Rys. 43 podpis niekompletny w opisie wykresów b) i c) należało dodać w funkcji koncentracji Ni, a na rysunkach opisać oś zawartości Ni przez x,
- str. 105, Rys. 59 należało zaznaczyć na rysunku linie *emisyjne  $4dGd, 4dTb$  i  $2sSi$*
- str. 113 Rys. 67 podobnie należało zaznaczyć na rysunku *linie emisyjne  $4dGd, 4dTb$* , nie zaznaczono linii emisyjnych Al,
- str. 130 nie tab. 15 lecz 16,
- str. 133, Rys. 84 w podpisie należy podać rodzaj próbki cz.  $Gd_{0.4}Tb_{0.6}(Co_{1-x}Ni_x)_2$
- str. 134 i w wielu innych miejscach, nie używa się określenia namagnesowania resztkowego, namagnesowanie remanencji lub pozostałość magnetyczna,
- str. 143 doktorant nie wyjaśnia jak ocenił rząd przejścia fazowego, jedynie napisał, cytując: „*Na podstawie zależności  $\Delta S(T, \mu_0 H)$  oszacować można rząd przejścia fazowego badanych układów stosując hipotezę skalowania oraz relacje (38). Otrzymane rezultaty przedstawiono na rys. 95. i 96.*”

Podsumowując stwierdzam, że praca doktorska mgra Marcina Sikory *Własności magnetyczne i elektronowe związków  $Gd_{0.4}Tb_{0.6}(Co_{1-x}M_x)_2$ ,  $M = Ni, Fe, Al, Si$*  zawiera bardzo dużo wartościowych i oryginalnych wyników, które należy jak najszybciej opracować w formie publikacji. Doktorant wykazał się zdolnościami eksperymentalnymi wyrażonymi w umiejętności zastosowania wielu technik

eksperymentalnych: XRD, EPS, magnetometr SQUID (pomiar termomagnetyczny), PPMS (temperaturowe pomiar o elektrycznego), mikroskopia skaningowa, pomiar rozmiarów nanocząstek metodą DLS (Dynamic Light Scattering).

### Dorobek publikacyjny

Mgr Marcin Sikora nie zdążył opublikować wyników pracy doktorskiej, jedynie prezentował je na seminariach:

XVI KATOWICKO–KRAKOWSKIE SEMINARIUM Fizyka fazy skondensowanej, Chorzów, 16.05.2019. *Własności strukturalne, magnetyczne oraz elektronowe wybranych układów  $Gd_{0.4}Tb_{0.6}(Co_{1-x}A_x)_2$ , gdzie  $A = Ni, Fe, Al, Si$ , (prezentacja ustna).*

XV KATOWICKO–KRAKOWSKIE SEMINARIUM Fizyka fazy skondensowanej, Chorzów, 20.04.2018. *Własności magnetyczne oraz strukturalne  $Gd_{0.4}Tb_{0.6}(Co_{1-x}Ni_x)_2$  (prezentacja ustna).*

XIV KATOWICKO–KRAKOWSKIE SEMINARIUM Fizyka fazy skondensowanej, Kraków, 20 kwietnia 2017. *Efekt magnetokaloryczny w wybranych związkach  $Gd_{0.4}Tb_{0.6}(Co_{1-x}Tx)_2$ ,  $T = Fe, Ni$  (prezentacja ustna).*

W trakcie studiów doktoranckich sumiennie pracował z zespołem pani prof. Grażyny Chełkowskiej publikując dwie prace nie związane z tematem rozprawy doktorskiej, ale dotyczące związku ziemia rzadka – metal przejściowy  $Sm(Ni_{1-x}Co_x)_3$ :

A. Majtyka, M. Sikora, D. Blachiński, G. Chełkowska, J. Deniszczyk *Electronic Structure of  $Sm(Ni_{1-x}Co_x)_3$  Alloys— XPS and ab initio Study*, Acta. Phys. Polon. A, Vol. 133, 673 (2018).

M. Sikora, D. Blachiński, K. Ociepka, K. Prusiak, A. Bajorek, G. Chełkowska *Influence of Substitution and Milling on Structural and Magnetic Properties of Selected  $Sm(Ni_{1-x}Co_x)_3$  Compounds*, Acta. Phys. Polon. A, Vol. 133, 486 (2018).

Powyższe prace doktorant prezentował na The European Conference: PHYSICS OF MAGNETISM 2017 (PM'17), Poznań, 26-30 czerwca 2017 w sesji plakatowej.

### Wniosek końcowy

Na podstawie przeprowadzonej oceny rozprawy doktorskiej stwierdzam, że spełnia ona wymagania ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z późn. zm.) i stawiam wniosek do Rady Instytutu Fizyki im. Augusta Chełkowskiego Uniwersytetu Śląskiego o dopuszczenie pana mgra Marcina Sikory do publicznej obrony.

