

Prof. dr hab. Andrzej Szewczyk  
Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk  
Al. Lotników 32/46  
02-668 Warszawa

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Łukasza Frąckowiaka,  
zatytułowanej:  
„Oddziaływania pomiędzy warstwami ferromagnetyczną i ferrimagnetyczną oraz w  
obrębie ferrimagnetycznej warstwy poddanej strukturyzacji magnetycznej”,  
przygotowanej pod opieką dr. hab. inż. Piotra Kuświka,  
przedstawionej Radzie Naukowej Instytutu Fizyki Molekularnej PAN w Poznaniu**

W przedłożonej rozprawie mgr Frąckowiak przedstawia szczegółowe i logicznie zaplanowane badania dotyczące kilku ważnych problemów naukowych związanych z fizyką wielowarstw magnetycznych, wykazujących tzw. „anizotropię prostopadłą”, tj anizotropię jednoosiową z kierunkiem łatwego magnesowania prostopadłym do płaszczyzny warstw. Jak wiadomo, obiekty takie wzbudzają bardzo duże zainteresowanie już od dłuższego czasu, ze względu na możliwość zastosowania ich w informatyce (np. w elementach pamięci czy w urządzeniach do transmisji danych), a także w magnonice. Konkretnie:

1. Autor porównał właściwości magnetyczne ferrimagnetycznych (a ściślej - sperimagnetycznych) warstw stopowych Tb-Co i Tb-Fe, w których wytworzono gradient zawartości Tb, a co za tym idzie i gradient temperatury kompensacji - z właściwościami wielowarstw tworzących strukturę ferrimagnetyczną, będących 6-krotnym powtórzeniem klinowej warstwy terbu (o grubości od 0 do 2 nm) i warstwy kobaltu lub żelaza o grubości 0.66 nm. Poprzez zastosowanie klinowej warstwy terbu, a więc i gradientu zawartości Tb w składniku ferrimagnetycznym, Autor uzyskiwał w jednym procesie technologicznym strukturę ferrimagnetyczną z gradientem temperatury kompensacji. Najistotniejszym rezultatem tej części pracy było wyznaczenie (metodą mikroanalizy rentgenowskiej) rozkładu zawartości terbu w próbkach i powiązanie tego parametru w obu rodzajach próbek (tj. w próbkach stopowych i wielowarstwowych) z wyznaczonym metodami magnetooptycznymi (P-MOKE) rozkładem pola koercji. Stwierdzono, że koncentracja Tb jest czynnikiem decydującym i że właściwości magnetyczne (pole koercji i rozkład temperatury kompensacji) są w obu rodzajach próbek zbliżone.
2. Autor rozważył problem sprzężenia pomiędzy podukładem ferromagnetycznym (F) i ferrimagnetycznym (FI) poprzez niemagnetyczną przekładkę złota, w dwóch konfiguracjach. W pierwszej konfiguracji przekładka występowała w otoczeniu Co-Au-Co, a elementem F była wielowarstwa: (Au-1 nm/Co-0.8 nm)<sub>2</sub>. Z kolei element FI tworzyła warstwa Co o grubości 0.8 nm i naniesiona na nią 6-krotnie powtórzona struktura: klinowa warstwa Tb o grubości od 0 do 2 nm i warstwa Co (lub Fe) o grubości 0.66 nm. W drugiej konfiguracji przekładka występowała w otoczeniu Co-Au-Tb, a elementem F była wielowarstwa (Au-1 nm/Co-0.8 nm)<sub>3</sub>. Element FI tworzyła 6-krotnie powtórzona struktura: klinowa warstwa Tb o grubości od 0 do 2 nm i warstwa Co (lub Fe) o grubości 0.66 nm. Również w tym przypadku zastosowanie klinowej warstwy Tb pozwoliło autorowi uzyskać modyfikację

temperatury kompensacji elementu ferrimagnetycznego w szerokim zakresie. Ważnym i logicznym uzupełnieniem badań opisanych wyżej struktur było wytworzenie i zbadanie struktury, w której niemagnetyczna przekładka Au, w konfiguracji Co-Au-Tb, była warstwą klinową, co umożliwiło zbadanie wpływu grubości niemagnetycznej przekładki na charakter i siłę sprzężenia FI-F. Za najistotniejsze rezultaty tej części pracy uważam: (i) zbadanie procesu przemagnesowania struktur FI-F w funkcji zmian zawartości Tb w elemencie FI, (ii) wykazanie, że zmiana zawartości Tb ma silny wpływ na temperaturę kompensacji elementu FI, a co z tym związane - również na wartość pola przełączania segmentu F, (iii) wykazanie, że otoczenie niemagnetycznej przekładki Au ma gigantyczny wpływ na wartość i znak sprzężenia pomiędzy segmentami FI i F, (iv) wykazanie, że znak i wielkość sprzężenia pomiędzy segmentami FI i F oscylują w funkcji grubości przekładki Au, co wskazuje na to, że dużą rolę w tym sprzężeniu odgrywa oddziaływanie typu RKKY. Wyniki tej części pracy zostały opublikowane w *Sci. Rep.* **8**, 16911 (2018).

3. Autor przedstawił proces wytwarzania - metodą fotolitografii - struktury kwadratów na ferrimagnetycznej strukturze wielowarstwowej zbudowanej z 6-krotnie powtórnego segmentu: klinowa warstwa Tb o grubości 0 - 2 nm, a na niej warstwa Co o grubości 0.66nm, a następnie wykonał badania wpływu naświetlenia kwadratów (nieosłoniętych przed strumieniem jonów) różną dawką jonów  $\text{He}^+$  o energii 10 keV - na ich właściwości magnetyczne. Szczególnie interesujące i wartościowe w tej części pracy wydaje mi się zbadanie metodą SIMS rozkładu pierwiastków w próbce, w funkcji odległości od powierzchni. Pozwoliło to Autorowi wyjaśnić fizyczny mechanizm „dezaktywacji magnetycznej” części jonów Tb i zmianę temperatury kompensacji warstwy ferrimagnetycznej pod wpływem strumienia jonów. Autor ustalił, że strumień jonów wytwarza w próbce kanały wzdłuż których dyfunduje do wnętrza próbki tlen, który utlenia i „unieczynnia” magnetycznie część jonów Tb. Ważnym rezultatem jest też dokładne zbadanie - metodami magnetoopiecznymi - procesów przemagnesowania wytworzonej struktury. Szczególnie interesujące jest wykrycie dwóch stanów: (i) stanu, w którym w wytworzonej strukturze istnieją domeny (tj. w wyniku tego, że różne elementy struktury mają inną temperaturę kompensacji, mają też one przeciwnie skierowane namagnesowanie wypadkowe), a równocześnie brak jest ścian domenowych, rozumianych jako wąskie obszary, w których następuje przeorientowanie momentów magnetycznych poszczególnych podsieci ferrimagnetyka oraz (ii) stanu, w którym w strukturze nie ma domen (tj. obszary o różnej temperaturze kompensacji mają skierowane w tę samą stronę namagnesowanie wypadkowe), a równocześnie istnieją ściany domenowe, w których następuje przeorientowanie momentów magnetycznych poszczególnych podsieci ferrimagnetyka. Rezultaty tej części pracy zostały opublikowane w *Phys. Rev. Lett.* **124**, 047203 (2020) i *Sci. Rep.* **11**, 1041 (2021).

Przedstawiona praca ma charakter monografii, przy czym praktycznie wszystkie wyniki zaprezentowane w niej zostały już opublikowane w trzech artykułach, których pierwszym autorem jest mgr Frąckowiak. Jeden z tych artykułów zamieszczony jest w szczególnie cenionym przez fizyków czasopiśmie *Physical Review Letters* i został on wyróżniony przez edytorów tego czasopisma poprzez nadanie mu statusu „Editors’ Suggestion”. Także dwa pozostałe artykuły są zamieszczone w dobrym czasopiśmie *Scientific Reports*, posiadającym duży



„impact factor” (5,133). Również zdecydowana większość rysunków zamieszczonych w pracy jest tożsama (czasami z niewielkimi modyfikacjami) z rysunkami zamieszczonymi w ww. trzech artykułach. Wspomniane artykuły są pracami wieloautorskimi, rodzi się więc pytanie, czy wkład Doktoranta w ich powstanie był na tyle duży, iż może być uznany za jego - jak tego wymaga ustawa - „oryginalne rozwiązanie problemu naukowego”? Biorąc pod uwagę to, że:

1. We wszystkich trzech publikacjach Doktorant jest pierwszym autorem, a lista autorów nie jest uszeregowana zgodnie z porządkiem alfabetycznym.
2. Na stronie 24. rozprawy, na początku rozdziału 4. „Metodyka badawcza” Autor precyzuje swój wkład w przedstawiane badania, stwierdzając, że samodzielnie:
  - przeprowadził wszystkie pomiary pętli histerezy,
  - przeprowadził pomiary składu układów stopowych wykorzystanych do weryfikacji opracowanego przez Autora modelu numerycznego,
  - wykonał naświetlenia jonowe i opracował uzyskane wyniki,a ponadto aktywnie uczestniczył w eksperymentach dotyczących obrazowania struktury domenowej i wspólnie z osobami uczestniczącymi w eksperymentach zinterpretował uzyskane wyniki,

uważam, że należy odpowiedzieć twierdząco na to pytanie, tj. uznać, że przedstawiona rozprawa stanowi „oryginalne rozwiązanie problemu naukowego” przez mgr. Frąckowiaka.

Jeżeli chodzi o stronę redakcyjną rozprawy, to warto podkreślić, że spotyka się dwa podejścia do rozpraw doktorskich. Część autorów uważa, że ma to być syntetyczny raport z przeprowadzanych badań, adresowany głównie do specjalistów zajmujących się podobną tematyką, natomiast inni doktoranci uważają, że ma to być obszerniejsze opracowanie o charakterze dydaktycznym, adresowane do szerszego kręgu odbiorców, zawierające oprócz prezentacji własnych wyników, również szersze przedstawienie podjętego zagadnienia naukowego, metodyki badań i zastosowanych technik badawczych. Recenzowana rozprawa jest przykładem właśnie tego drugiego - preferowanego przeze mnie - podejścia i uważam, że jest ona przystępnie napisanym źródłem cennych informacji o fizyce wielokrotnych warstw magnetycznych. Myślę, że będzie ona interesującą pozycją literaturową nie tylko dla specjalistów, ale również dla osób, które nie zajmują się na co dzień tematyką warstw wielokrotnych. Zdecydowaną większość rozprawy czyta się lekko i pewne problemy pojawiają się dopiero w rozdziale 7., gdy autor, opisując złożone procesy przemagnesowania kolejnych elementów strukturyzowanych warstw wielokrotnych, posługuje się bardzo rozbudowanymi zdaniami, co wymaga od czytelnika skupienia uwagi. Niemniej jednak daje się ten opis „rozszyfrować”. Bardzo pozytywne jest to, że rozprawa ma logiczną, przejrzystą strukturę, tzn. przedstawia kolejno: zwięzłe omówienie właściwości wielokrotnych warstw magnetycznych, omówienie zastosowanych metod badawczych, wyników badań warstw stopowych i wielowarstw Tb-Co i Tb-Fe, wyników badań warstw FI/F, procedury strukturyzacji warstw za pomocą naświetlania jonami  $\text{He}^+$  i procesów przemagnesowania strukturyzowanych wielowarstw, a w ostatnim rozdziale - zwięzłe zestawienie uzyskanych rezultatów. Za bardzo trafne posunięcie uważam zamieszczenie rysunków 37 i 38, bardzo dobrze wyjaśniających strukturę badanych wielowarstw i położenie niemagnetycznej przekładki. Oczywiście rozprawa posiada pewne niedoskonałości i mam do niej następujące uwagi krytyczne:

1. Za niezręczne uważam nazywanie namagnesowania ferrimagnetycznego segmentu warstw wielokrotnych - namagnesowaniem efektywnym. Myślę, że termin „namagnesowanie



- wypadkowe” lepiej oddawałby rzeczywistość. Również niezręczne jest stosowanie terminu „energia demagnetyzacji”, zamiast - „energia odmagnesowania”.
2. Razi mnie to, że Autor pisze o naświetlaniu lub bombardowaniu warstw wiązką jonów „z dawką” taką czy inną. Sądzę, że należałoby pisać o naświetlaniu „dawką”. Niezręczna jest też fraza ze str. 34: „ZAMODELOWANA została powierzchnia targetu”.
  3. Uważam, że rysunek 65 (ostatni), który miał podsumowywać właściwości warstw RE-TM jest nieczytelny, nie najlepiej opisany i niewiele wyjaśnia, pomijając już to, że w opisie kolory strzałek są „przestawione”, gdyż na rysunku czerwonym kolorem oznaczone są momenty RE, a niebieskim - TM.
  4. Na stronie 5, omawiając „Anizotropię magnetokrystaliczną”, Autor pisze, że „Źródłem tej anizotropii jest oddziaływanie spin-orbita”. Jest to stwierdzenie nieprecyzyjne, gdyż w rzeczywistości problem jest bardziej złożony i wkład do anizotropii mogą wносить również inne zjawiska, np. anizotropowe oddziaływanie wymiany. Stąd sądzą, że sformułowanie „głównym źródłem” albo „najczęściej źródłem...” byłoby właściwsze.
  5. Na str. 6., opisując wzór (2.8), Autor pisze „gdzie:  $m$  jest wersorem magnetyzacji, a  $n$  normalną do płaszczyzny”. Tyle że we wzorze (2.8) nie ma ani symbolu  $m$ , ani  $n$ .
  6. Niezbyt podoba mi się Rys. 5. Autor odwołuje się do niego w tekście, pisząc: „Ze względu na przestrzenny rozkład spinów w DW możemy wyróżnić jej dwa podstawowe typy: Blocha i Néela (Rys. 5)”. W takiej sytuacji oczekiwałbym, że na rysunku będą istotnie przedstawione klasyczne, książkowe rozkłady momentów magnetycznych w takich ścianach, w materiale objętościowym. Tymczasem Autor przedstawia na rysunku ściany w bardziej interesującym go obiekcie, tj. w warstwie. Trzeba jednak pamiętać, że w warstwach, ze względu na ich niewielką grubość, istotne jest pojawianie się „ładunków magnetycznych” na powierzchniach warstwy nawet w przypadku ścian Blocha i w rezultacie ściany domenowe w warstwach mają często strukturę „mieszaną” i ich podział na ścianę Blocha i Néela bywa umowny. Jeżeli przyjmujemy za podstawę zdefiniowania typu ściany sposób przeorientowywania się momentów magnetycznych w środku warstwy, to rodzi się pytanie, co właściwie przedstawiają zamieszczone na rysunkach 5a i 5b elipsy? Zgodnie z opisem rysunku jest to „rozmieszczenie ładunków magnetycznych”. Ale skoro tak i skoro na rysunku przedstawiona jest warstwa o anizotropii typu „łatwa płaszczyzna” (tak przynajmniej sugerują zaznaczone kierunki namagnesowania w obu, oddzielonych ścianą domenach), to dlaczego w przypadku ściany Blocha „ładunki” miałyby się pojawiać najpierw wewnątrz warstwy, a dopiero w centrum ściany miałyby być one na powierzchni? Myślę, że Autorowi chodziło o przedstawienie rozkładu „ładunków” na powierzchni warstwy, ale z rysunku to nie wynika. Z kolei jeśli chodzi o elipsę zaznaczoną dla przypadku ściany Néela, to oczywiście rozumiem, że gęstości „różnoimiennych ładunków magnetycznych” powinny być symetryczne względem środka ściany, ale dlaczego - dla przypadku anizotropii typu łatwa płaszczyzna - gęstość ładunków miałaby zależeć od odległości od środka warstwy? Tak więc rysunek ten nie wydaje mi się dobrą ilustracją struktury idealnych ścian Blocha i Néela.
  7. Wzór (2.17) podający jedną z definicji szerokości ściany jest dość dziwny. Otóż definiuje on szerokość jako całkę z kosinusa kąta orientacji namagnesowania względem normalnej do warstwy, wziętą od - do + nieskończoności. Ale przecież kosinus jest funkcją bezwymiarową, a szerokość powinna być wyrażona w jednostkach długości?
  8. Uważam, że na stronie 15 Autor podaje niewłaściwe wyjaśnienie sprzężenia wymiennego w stopach RE-TM. Otóż pisze on: „Najbardziej prawdopodobnym mechanizmem



wyjaśniającym tego typu sprzężenie jest oddziaływanie pośrednie pomiędzy elektronem 4f a 3d poprzez ELEKTRON Z POWŁOKI 5d ziemi rzadkiej (hybrydyzacja 3d-5d-4f [30]). Elektrony 4f-5d oddziałują ze sobą ferromagnetycznie, a następnie elektron 5d oddziałuje antyferromagnetycznie z elektronem na powłoce 3d...”. Problem polega na tym, że w grupie lantanowców tylko Ce posiada jeden elektron na powłoce 5d, a pozostałe pierwiastki mają tę powłokę pustą. Stąd opis mówiący o ferromagnetycznym oddziaływaniu elektronu 5d z elektronami 4f i antyferromagnetycznym z elektronami 3d atomów metalu przejściowego nie jest poprawny. Uważam, że fragment ten mógłby mieć brzmienie: „Najbardziej prawdopodobnym mechanizmem tego typu sprzężenia jest oddziaływanie pośrednie pomiędzy elektronami 4f i 3d poprzez proces hybrydyzacji 3d-5d-4f, tj. oddziaływanie zachodzące w taki sposób, że następuje hybrydyzacja stanów 4f i 5d atomu ziemi rzadkiej i elektron zajmujący ten zhybrydyzowany stan i mający spin równoległy do spinu pozostałych elektronów 4f, sprzęga się antyferromagnetycznie z elektronem z powłoki 3d metalu przejściowego”. W tym kontekście niepoprawne jest też zdanie ze strony 16, mówiące, że „w wyniku silnego ekranowania elektronów 4f przez elektrony na powłokach 5d i 6s pole krystaliczne oddziałujące na elektrony 4f jest znacznie osłabione”. Tu też trzeba by pisać nie o elektronach z powłoki 5d, a o elektronach 5s i 5p.

9. Jako czytelnik, który nie zajmował się litografią, jestem nieco zdezorientowany opisem tego procesu. Otóż podrozdział 4.5 zatytułowany jest „Fotolitografia bezmaskowa”, a już na jego wstępie Autor opisuje proces pokrywania próbki rezystem i wytwarzania maski, np. za pomocą wiązki światła. Dalej twierdzi, że w rozprawie wykorzystano fotolitografię bezmaskową (rozumiem, że chochlik drukarski sprawił, że Autor użył tu słowa „bezsmakową”), a potem pisze o pokryciu próbki fotorezystem i wykorzystaniu wiązki lasera. Zastanawiam się więc, co w tym kontekście oznacza słowo „bezmaskowa”?
10. W kilku miejscach występują fragmenty sugerujące, że Autor albo powierzył redakcję komputerowemu tłumaczowi z języka angielskiego, albo sam przetłumaczył frazę z angielskiego słowo po słowie, nie analizując znaczenia tekstu. Na przykład:
  - a. Analizując wpływ „kominka” na osadzanie materiału, na str. 38 Autor pisze, że dla dużych wartości parametru  $\rho$  „proces osadzania całkowicie zanika” i że efekt ten „pozwała zapobiegać nadmiernej kontaminacji osadzanego materiału na ściankach komory próżniowej”. Nie bardzo rozumiem, jakie znaczenie może mieć zanieczyszczenie „osadzanego materiału”, który osadza się na ściankach komory. Podejrzewam, że Autorowi chodziło o wyrażenie myśli, że efekt ten zapobiega nadmiernemu zanieczyszczaniu ścianek komory próżniowej osadzonym materiałem.
  - b. Na str. 46. Autor pisze, że „Ferromagnetyczne wielowarstwy xxx w pomiarach P-MOKE charakteryzują się prostokątną pętlą histerezy”. No przecież kształt pętli histerezy jest właściwością materiału, niezależnie od tego jakim magnetometrem posługujemy się. Właściwsze byłoby tu sformułowanie, że badania P-MOKE wykazały, że ferromagnetyczne warstwy xxx mają prostokątną pętlę histerezy.
  - c. Na str. 62. Autor pisze: „Po bombardowaniu [...] orientacja pętli histerezy ma taką samą dominację podsieci (Tb+) jak obszar przed bombardowaniem”. Trudno zrozumieć tę frazę, może Autorowi chodziło o to, że po bombardowaniu pętla histerezy w obszarach naświetlonych ma taki sam kształt, jak dla obszarów chronionych przed bombardowaniem, charakterystyczny dla materiału z dominacją podsieci Tb (Tb+).

11. Przedstawione na rys. 45. pętle histerezy po naświetleniu dawką  $D \geq 4 \cdot 10^{15} \text{ He}^+/\text{cm}^2$  wykazują powyżej pola nasycenia pewną „podatność” z ujemnym nachyleniem dla  $H < 0$  i dodatnim dla  $H > 0$ . Interesujący byłby komentarz Autora dotyczący źródła tego zjawiska.
12. Jak wspomniałem wyżej, Autor często używa bardzo rozbudowanych, wielokrotnie złożonych zdań i w rezultacie zdarza się, że traci kontrolę nad odpowiednimi końcówkami wyrazów. Sądzę, że gdyby Autor przed wydrukowaniem pracy jeszcze raz ją dokładnie przeczytał, to wpłynęłoby to pozytywnie na jakość pracy i pozwoliłoby wyeliminować wiele pomyłek redakcyjnych.

Wymienione wyżej uwagi krytyczne dotyczą w większości strony redakcyjnej pracy i nie mają wpływu na moją wysoką ocenę zawartości rozprawy i przedstawianych w niej badań.

Konkludując, stwierdzam, że przedłożona rozprawa spełnia z nawiązką wymagania stawiane rozprawom doktorskim w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym” oraz w „Uchwale Rady Naukowej Instytutu Fizyki Molekularnej PAN nr 114/2020, z dnia 2 grudnia 2020 roku” i zwracam się do Rady Naukowej Instytutu Fizyki Molekularnej Polskiej Akademii Nauk z wnioskiem o dopuszczenie mgr. inż. Łukasza Frąckowiaka do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora.

Poza tym, biorąc pod uwagę wysoką rangę przedstawionych w rozprawie wyników - zostały one opublikowane w trzech artykułach zamieszczonych w *Physical Review Letters* oraz w *Scientific Reports* - a także walory dydaktyczne przedłożonej rozprawy, występuję do Rady Naukowej Instytutu Fizyki Molekularnej PAN z wnioskiem o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Łukasza Frąckowiaka.



Andrzej Szewczyk