

Recenzja rozprawy doktorskiej mgra Adama Krysztofika zatytułowanej:

**„Dynamika namagnesowania cienkich warstw  
granatu itrowo-żelazowego  $Y_3Fe_5O_{12}$ ”**

wykonanej w Instytucie Fizyki Molekularnej Polskiej Akademii Nauk w Poznaniu

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgra Adama Krysztofika złożona jest z pięciu wymienionych poniżej artykułów naukowych, opublikowanych w latach od 2017 do 2022:

- [1] A. Krysztofik, H. Głowiński, P. Kuświk, S. Ziętek, L.E. Coy, J.N. Rychły, S. Jurga, T.W. Stobiecki, J. Dubowik, **Characterization of spin wave propagation in (111) YIG films with large anisotropy**, Journal of Physics D: Applied Physics **50**, 235004 (2017)
- [2] A. Krysztofik, L.E. Coy, P. Kuświk, K. Załęski, H. Głowiński, J. Dubowik, **Ultra-low damping in lift-off structured yttrium iron garnet thin films**, Applied Physics Letters **111**, 192404, 2017
- [3] A. Krysztofik, S. Özoğlu, E. Coy, **Magnetization damping in nanocrystalline yttrium iron garnet thin films grown on oxidized silicon**, IEEE Magnetics Letters **12**, 7101605, 2021
- [4] A. Krysztofik, S. Özoğlu, R.D. McMichael, E. Coy, **Effect of strain-induced anisotropy on magnetization dynamics in  $Y_3Fe_5O_{12}$  films recrystallized on a lattice-mismatched substrate**, Scientific Reports **11**, 14011, 2021
- [5] A. Krysztofik, N. Kuznetsov, H. Qin, L. Flajšman, E. Coy, S. van Dijken, **Tuning of Magnetic Damping in  $Y_3Fe_5O_{12}$  / metal bilayers for spin-wave conduit termination**, Materials **15**, 2814, 2022

Kopie tych publikacji mgr Adam Krysztofik umieścił w rozdziale 4 swojej rozprawy doktorskiej, zatytułowanym „Wyniki badań”, poprzedzając każdą kopię krótkim wstępem i

opisem swego indywidualnego wkładu w przygotowanie tej publikacji, a w przypadku prac [2], [4] i [5] – dołączając również opublikowane informacje uzupełniające. W części przedwstępnej rozprawy mgr Adam Krysztofik podał informacje o swoich publikacjach nie wliczonych do rozprawy, a także o udziale w konferencjach, projektach i stażach naukowych. W rozdziale 1 zawarł wstęp, w rozdziale 2 opisał podstawowe właściwości granatu itrowo-żelazowego, oraz podstawy teoretyczne zjawisk pozwalających na badanie dynamicznych właściwości magnetycznych tego materiału, w tym przypadku rezonansu ferromagnetycznego i fal spinowych. Rozdział 3 poświęcił technikom preparacji próbek i technikom badawczym, wykorzystywanym podczas przygotowywania pracy doktorskiej, i przedstawił kolejno: impulsową ablację laserową (PLD), magnetronowe rozpylanie jonowe, bezmaskową litografię optyczną, dyfrakcję rentgenowską (XRD), reflektometrię rentgenowską (XRR), dyfrakcję rentgenowską pod kątem ślizgowym (GIXRD), skaningową mikroskopię elektronową (SEM), mikroskopię sił atomowych (AFM), magnetometrię z wibrującą próbką (VSM), magnetometrię SQUID, szerokopasmową spektroskopię rezonansu ferromagnetycznego (VNA-FMR), spektroskopię fal spinowych z wykorzystaniem wektorowego analizatora obwodów, oprogramowanie do modelowania mikromagnetycznego MuMax3 i oprogramowanie do analizy danych Mathematica. Po rozdziale 5, stanowiącym podsumowanie, umieścił bibliografię, liczącą 206 pozycji, a na zakończenie wkopiował oświadczenia współautorów (w liczbie 15, w tym oświadczenie własne) o ich wkładzie w przygotowanie publikacji, stanowiących rozprawę doktorską.

Biorąc pod uwagę dane bibliograficzne wymienionych powyżej publikacji, pragnę na początku zwrócić uwagę na dwie sprawy, mające istotne znaczenie dla merytorycznej oceny rozprawy.

Po pierwsze: wszystkie publikacje są wieloautorskie. Oznacza to, że – zgodnie z Art. 187 „Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” – recenzowana rozprawa musi być potraktowana jako „wyodrębniona część pracy zbiorowej” i w konsekwencji konieczne jest dokonanie oceny samodzielnego wkładu mgra Adama Krysztofika w jej przygotowanie. W tym przypadku jest to sprawa o tyle prosta, że we wszystkich publikacjach nazwisko mgra Adama Krysztofika znajduje się na pierwszym miejscu na liście autorów, co domyślnie oznacza jego istotny autorski udział. Analiza treści oświadczeń mgra Adama Krysztofika, zamieszczonych przed kopią każdej publikacji oraz treści oświadczeń wszystkich pozostałych współautorów, pozwala na jednoznaczne sformułowanie wniosku o ważnym wkładzie mgra Adama Krysztofika, który: (1) w przypadku

każdej publikacji napisał pierwszą wersję rękopisu, przeprowadził analizę danych eksperymentalnych i analizę literaturową, naniósł warstwy metodą PLD, wykonał pomiary VNA-FMR, zwizualizował wyniki i przygotował odpowiedzi na pytania recenzentów; (2) w przypadku większości publikacji przeanalizował dane teoretyczne, wykonał pomiary VSM i pomiary kątowe FMR, a także prowadził korespondencję z wydawnictwami; (3) w przypadku niektórych publikacji dokonał obliczeń teoretycznych, wykonał pomiary za pomocą technik XRD, XRR, GIXRD, SEM, wykonał pomiary spektroskopii fal spinowych z wykorzystaniem VNA oraz przeprowadził symulacje mikromagnetyczne. W oparciu o to zestawienie oceniam jako dominujący wkład mgra Adama Krysztofika w przeprowadzenie badań przedstawionych w rozprawie doktorskiej.

Po drugie: wszystkie publikacje zostały opublikowane w recenzowanych czasopismach naukowych o zasięgu międzynarodowym. W związku z tym każdej pozycji można przypisać odpowiednią punktację z wykazu Ministerstwa Edukacji i Nauki oraz wskaźnik Impact Factor (IF). Parametry te zebrałem w poniższej tabeli:

Publikacja	Czasopismo	Liczba punktów z wykazu MEiN*	IF**
[1]	Journal of Physics D: Applied Physics	70	3.409
[2]	Applied Physics Letters	100	3.971
[3]	IEEE Magnetics Letters	70	1.52
[4]	Scientific Reports	140	4.996
[5]	Materials	140	3.748

\*„Scalony wykaz czasopism naukowych i recenzowanych materiałów z konferencji międzynarodowych” będący załącznikiem do Komunikatu Ministra Edukacji i Nauki z dnia 21 grudnia 2021 r. o zmianie i sprostowaniu komunikatu w sprawie wykazu czasopism naukowych i recenzowanych materiałów z konferencji międzynarodowych.

\*\*Web of Science – Journal Citation Reports

Całkowita liczba punktów „ministerialnych” wynosi w tym przypadku 520, natomiast sumaryczny Impact Factor osiąga wartość 17.644. Są to w mojej ocenie liczby stosunkowo duże, świadczące o bardzo dobrej jakości całego zestawu publikacji stanowiącego rozprawę doktorską.

Analiza zawartości merytorycznej publikacji stanowiących rozprawę doktorską, pozwala na stwierdzenie, że tworzą one powiązany tematycznie zbiór, bowiem wszystkie

traktują o wzbudzeniach fal spinowych w cienkich warstwach granatu itrowo-żelazowego  $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  (w skrócie YIG) i wszystkie koncentrują się na poszukiwaniu związków pomiędzy dynamicznymi właściwościami magnetyzacji i właściwościami strukturalnymi warstw osadzanych na różnych podłożach, ale za każdym razem za pomocą metody impulsowej ablacji laserowej.

Granat itrowo-żelazowy jest materiałem już nie takim nowym, ale w ostatnich latach przechodzi swoisty renesans jako obiekt badań fizyki magnetyzmu. Tak się złożyło, że gdy przed czterdziestu laty dołączyłem do zespołu zajmującego się badaniem magnetyków w białostockim ośrodku uniwersyteckim, to pierwszym materiałem, z jakim miałem do czynienia i jakim zajmowałem się przez następnych kilkanaście lat, był właśnie YIG i to domieszkowany m.in. kobaltem. W owym czasie ogólną inspiracją podejmowania badań tych materiałów było dążenie do opracowania komputerowej pamięci wykorzystującej magnetyczne domeny cylindryczne jako nośnik informacji. W związku z tym w centrum zainteresowania znajdowały się warstwy YIG o grubości rzędu 10 mikrometrów, osadzone metodą epitaksji z fazy ciekłej na granacie gadolinowo-galowym. W warstwach tych występowała struktura domenowa o okresie rzędu kilku mikrometrów i – w odpowiednich warunkach – mogły się w nich uformować domeny cylindryczne. Moje wcześniejsze spotkania z YIG zwiększyły moje zainteresowanie rozprawą doktorską mgra Adama Krysztofika, bowiem niosła ona informacje o nowych zdobyczach wiedzy w tym temacie, wypracowanych przez kolejne pokolenie naukowców.

Zawartość merytoryczna poszczególnych publikacji stanowiących rozprawę doktorską jest następująca:

Publikacja [1] opisuje badania propagacji powierzchniowych fal spinowych w warstwie YIG o grubości 82 nm, osadzonej na monokrystalicznym podłożu granatu gadolinowo-galowego  $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$  (w skrócie GGG) o orientacji (111). W publikacji [1] wykazano, że fale spinowe były w stanie propagować się w tej próbce na stosunkowo duże odległości, dochodzące do 150 mikrometrów, a więc że materiał charakteryzował się niewielką wartością stałej tłumienia Gilberta. Pokazano także, iż w celu precyzyjnego określenia liczby falowej fal spinowych konieczne było uwzględnienie anizotropii magnetycznej, która w tym przypadku miała charakter anizotropii jednoosiowej zaindukowanej w procesie wzrostu warstwy YIG i która miała duży wpływ na częstotliwości fal spinowych i na ich prędkości grupowe. W oparciu o tę publikację mgr Adam Krysztofik sformułował jeden z wniosków końcowych swojej rozprawy doktorskiej stwierdzając, że

podłoże GGG jest optymalne w przypadku, gdy celem jest uzyskanie cienkich warstw YIG o małym tłumieniu magnetycznym.

Publikacja [2] dotyczy wyznaczenia ważnych z punktu widzenia dynamiki fal spinowych parametrów strukturalnych i magnetycznych warstw YIG o grubości 70 nm, osadzonych na granacie gadolinowo-galowym o orientacji (001) i poddanych dodatkowej strukturyzacji. Strukturyzacja została wykonana za pomocą bezmaskowej litografii optycznej i polegała na wytworzeniu regularnej sieci kwadratów YIG o boku 0.5 mm i odległościach pomiędzy kwadratami równymi 0.5 mm. Stwierdzono, że pomimo narzuconej przez litografię konieczności osadzania warstw w temperaturze pokojowej (typowo warstwy metodą PLD osadza się w temperaturze rzędu 600°C; warto w tym miejscu jeszcze dodać, że w każdym przypadku próbki poddawane są – już po osadzeniu – wygrzewaniu w temperaturze ok. 800°C), wyznaczona wartość tłumienia Gilberta (równa  $5 \times 10^{-4}$ ) jest podobna do wartości tej stałej dla warstw osadzanych w wysokich temperaturach. Stwierdzono także, iż strukturyzacja nie zmienia w sposób istotny ani parametrów strukturalnych, takich jak stała sieci czy szorstkość powierzchni, ani magnetycznych, takich jak namagnesowanie nasycenia, anizotropia czy tłumienie precesji magnetyzacji, i że powoduje uformowanie ostrych i dobrze określonych brzegów strukturyzowanych kwadratów. We wnioskach końcowych Autorzy wyrazili nadzieję, że uzyskane wyniki dadzą się zastosować w rozwoju takich urządzeń magnonicznych i spintronicznych, których działanie bazuje na małej stałej Gilberta i na efektach związanych z krawędzią warstwy magnetycznej.

Publikacja [3] omawia strukturalne i magnetyczne konsekwencje osadzenia cienkich warstw YIG (o grubościach: 25, 37, 60 lub 125 nm) na amorficznym tlenku krzemu. W tym przypadku stwierdzono co prawda bardzo mocne zdefektowanie warstw YIG, ale jednocześnie wykazano, że pomimo tego współczynnik tłumienia Gilberta był stosunkowo niewielki i przyjmował wartości z przedziału  $(10 \div 20) \times 10^{-4}$  przy grubościach warstw YIG z zakresu od 25 do 60 nm, a więc był tylko od 2 do 4 razy większy niż uzyskany w publikacji [2]. Natomiast w sposób o wiele bardziej znaczący owe defekty strukturalne wpłynęły na szerokość linii rezonansowych, powodując duży wzrost tzw. parametru poszerzenia linii rezonansowej od niejednorodności magnetycznych, który osiągał wartości z przedziału od 30 do 60 mT dla warstw o grubościach od 25 do 125 nm, a więc był mniej więcej od 200 do 400 razy większy niż uzyskany w publikacji [2], jeżeli już kontynuować takie najprostsze porównanie. We wnioskach końcowych Autorzy wyrazili nadzieję, że uzyskane przez nich

wyniki ułatwią dalszy rozwój technologii osadzania warstw YIG na krzemie, co w przyszłości doprowadzi do uzyskania próbek o wąskich liniach rezonansowych i otworzy nowe możliwości wykorzystania fal spinowych w połączeniu z technologią CMOS.

Publikacja [4] poświęcona jest badaniom dynamiki magnetyzacji w cienkich warstwach YIG (o grubości 9,6, 17, 28, 37 lub 56 nm), ale tym razem osadzonych na monokrystalicznym granacie itrowo-glinowym  $Y_3Al_5O_{12}$  (w skrócie YAG) o orientacji (001). Znaczne niedopasowanie (ok. 3%) stałej krystalicznej sieci podłoża spowodowało w tym przypadku pojawienie się podczas rekrytalizacji naprężeń rozciągających i wygenerowanie magnetycznej anizotropii prostopadłej. Linia rezonansowa uległa znacznemu poszerzeniu, a na dodatek zależność szerokości linii rezonansowej od częstotliwości wykazywała ujemne nachylenie w zakresie częstotliwości od 5 do 30 GHz. Do opisu tego nietypowego zachowania Autorzy zaproponowali opracowany przez siebie model uwzględniający dyspersję anizotropii indukowanej naprężeniami i zakładający rozkład normalny zarówno wartości anizotropii jednoosiowej jak i jej kierunku dla różnych fragmentów próbki. We wnioskach końcowych Autorzy stwierdzili, że – po pierwsze – kontrolowanie naprężeń w procesie wzrostu warstw może być wykorzystane do generacji określonego typu anizotropii magnetycznej warstwy YIG i – po drugie – jednorodność naprężeń w próbce jest kluczowa do osiągnięcia małego tłumienia materiału, a więc i wąskiej linii rezonansowej.

Publikacja [5] prezentuje wyniki badań tłumienia magnetycznego w dwu-warstwach YIG/metal osadzonych na granacie gadolinowo-galowym. Warstwa YIG miała w tym przypadku grubość 40 nm, natomiast warstwa metalu – irydu, platyny lub złota – grubość zmieniającą się od 0 do 7 nm. Warstwa metalu była osadzona metodą magnetronowego rozpylania jonowego na podkładce GGG(111) (w przypadku Ir, Pt i Au) oraz GGG(001) (w przypadku Pt), a warstwa YIG – metodą impulsowej ablacji laserowej (czyli tak samo jak w całej rozprawie doktorskiej). Obecność międzywarstwy metalicznej spowodowała powstanie defektów strukturalnych i zwiększenie tłumienia magnetycznego. W najbardziej interesującym przypadku międzywarstwy złota stwierdzono niewielką zmianę stałej Gilberta, która utrzymywała się na poziomie ok.  $8 \times 10^{-4}$  dla całego zakresu zmienności grubości złota, i jednocześnie duży wzrost parametru poszerzenia linii rezonansowej od niejednorodności magnetycznych, który w zakresie grubości złota od 2 nm do 7 nm wzrósł od ok. 1 mT do 15 mT. We wnioskach końcowych Autorzy podkreślili, że uzyskane przez nich wyniki stanowią przepis na zadawanie dowolnej wartości parametru tłumienia magnetycznego YIG poprzez

dobór odpowiedniego składu i grubości metalicznej międzywarstwy i że takie dwu-warstwy YIG/metal, charakteryzujące się silnym tłumieniem, mogą znaleźć zastosowanie w zakończeniach falowodów magnonicznych, gdzie fala spinowa powinna być w jak największym stopniu pochłonięta i w jak najmniejszym stopniu odbita.

Podsumowując przegląd merytorycznej zawartości recenzowanej rozprawy doktorskiej, muszę z całym przekonaniem stwierdzić, że wyniki uzyskane przez mgra Adama Krysztofika są bardzo wartościowe i aktualne, bowiem dotyczą ważnej tematyki badawczej współczesnej fizyki magnetyzmu, jaką jest optymalizacja materiałów magnetycznych do różnych zastosowań w burzliwie rozwijającej się magnonice. Doskonałe opanowanie przez mgra Adama Krysztofika technologii preparatyki próbek i biegłe posługiwanie się licznymi nowoczesnymi metodami badawczymi, pozwoliło mu na swobodne eksperymentowanie z osadzaniem cienkich warstw YIG na różnych podłożach i na rzetelne wykonanie pomiarów ich parametrów zarówno strukturalnych jak też i magnetycznych. Mgr Adam Krysztofik podał szereg przepisów na uzyskanie materiału o takich czy innych przydatnych właściwościach i ten ogromny walor aplikacyjny uzyskanych przez mgra Adama Krysztofika rezultatów chciałbym tu jeszcze raz mocno podkreślić, bo już to powyżej zaznaczyłem, przywołując po opisie każdej pracy wnioski końcowe Autorów, silnie nakierowane właśnie na ewentualne zastosowania. Pragnę też zwrócić uwagę na cenną umiejętność opisu zaskakujących wyników, które pojawiły się podczas eksperymentów z nowatorskimi materiałami, czego najlepszym przykładem jest zbudowanie modelu uwzględniającego dyspersję anizotropii indukowanej naprężeniami do opisu ujemnego nachylenia zależność szerokości linii rezonansowej od częstotliwości w publikacji [4].

Zawartość merytoryczną rozprawy doktorskiej mgra Adama Krysztofika oceniam bardzo wysoko. Biorąc pod uwagę zasygnalizowany wcześniej dominujący wkład mgra Adama Krysztofika w osiągnięcie wyników zaprezentowanych w rozprawie, niniejszym wyrażam moją jednoznacznie pozytywną ocenę całej rozprawy doktorskiej, która niezbiecie świadczy – moim zdaniem – o posiadaniu przez mgra Adama Krysztofika odpowiedniej ogólnej wiedzy teoretycznej w zakresie fizyki i o umiejętności samodzielnego prowadzenia przez niego badań naukowych.

Ze względu na pozytywną ocenę rozprawy, moje uwagi krytyczne oraz pytania dotyczące szczegółów, których nie mogłem się doszukać w rozprawie, zostawiłem na zakończenie niniejszej recenzji. Oto one:

1. W publikacji [2] na rysunku 1b zaprezentowana jest analiza profilu wysokości krawędzi kwadratu próbki strukturyzowanej, wykonana w oparciu o obraz zarejestrowany z wykorzystaniem mikroskopu AFM. Z analizy tej wynika, że zmiana wysokości o wartości ok. 70 nm zachodzi na odległości poziomej równej ok. 170 nm. Czy podczas tej analizy uwzględniony był kształt ostrza sondy mikroskopu AFM?

2. W publikacji [3] warstwa YIG osadzana była na warstwie tlenku krzemu, a w publikacji [5] – na warstwach metalicznych. Czy w trakcie badań dało się zauważyć w tych przypadkach zmniejszoną adhezję warstwy YIG w stosunku do sytuacji, gdy warstwa YIG była osadzona na GGG lub YAG? Innymi słowy: czy warstwa YIG osadzana na tlenku krzemu lub na metalu jest mechanicznie na tyle trwała, aby mogła być bezpiecznie zastosowana w urządzeniach magnonicznych bez ryzyka rozwarstwienia, złuszczenia i odpadnięcia?

3. Na stronie 6 publikacji [4] (czyli na stronie 69 rozprawy), w trzeciej linijce od dołu Autorzy stwierdzili, że skonstruowany przez nich model dobrze opisuje eksperymentalne zależności szerokości linii rezonansowej od częstotliwości. Na poparcie swego stwierdzenia zaproponowali czytelnikowi porównywanie charakteru przebiegów wymodelowanych i doświadczalnych, zaprezentowanych na różnych wykresach. Czy ze względu na mnogość uzyskanych przebiegów eksperymentalnych i modelowanych nie byłoby łatwiej przekonać czytelnika poprzez nałożenie na jednym obrazku wybranych krzywych i bezpośrednie pokazanie, że dobrze do siebie pasują?

4. W dwóch publikacjach udało mi się znaleźć drobne usterki, które uszły uwadze recenzentów redakcyjnych i których niestety nie można już naprawić. Otóż w publikacji [3] w podpisie rysunku 2 brakuje oznaczenia panelu „(d)” przed zdaniem zaczynającym się od słów: „Resonance linewidth ...”. Natomiast w publikacji [4] w podpisie rysunku 4, w zdaniu wyjaśniającym znaczenie czerwonych krzywych widocznych w panelu (e), we fragmencie zdania „... and decreasing linewidth at low magnetic fields for IP orientaton is observed” znajduje się błędny odsyłacz do małych wartości pola magnetycznego, zamiast do małych częstotliwości. Jak łatwo jest zauważyć, na obu rysunkach panelu (e) na osi poziomej jest bowiem częstotliwość, a nie pole magnetyczne. Identyczny błąd znajduje się w tekście pracy w drugiej linijce od dołu na stronie 6 publikacji [4] (czyli na stronie 69 rozprawy).

5. W publikacji [5] na rysunku 2 w panelach (g) oraz (h) zaprezentowane zostały wyniki uzyskane za pomocą metody „super-Nyquist-sampling magneto-optical Kerr effect microscopy (SNS-MOKE)”. Niestety ta mniej znana metoda nie została opisana w rozdziale 3 rozprawy, co jest wyraźną niekonsekwencją ze strony mgra Adama Krysztofika, który w

tymże rozdziale starannie opisał wszystkie inne – nawet te powszechnie znane – metody badawcze, wykorzystane podczas przygotowania rozprawy.

6. Od strony formalnej cała rozprawa doktorska została napisana bardzo starannie, wręcz wzorowo. Najlepszym tego dowodem jest fakt, że mam tutaj tylko jedno – w zasadzie nic nie znaczące – zastrzeżenie. Otóż na stronie 19, w szóstej linijce od dołu, w zdaniu zaczynającym się od słów „Dla YIGu prowadzi to antyrównoległego uporządkowania ...” w sposób oczywisty brakuje przyimka „do”. Zdanie to powinno brzmieć następująco: „Dla YIGu prowadzi to do antyrównoległego uporządkowania ...”.

Pragnę jasno stwierdzić, że wymienione powyżej uwagi krytyczne nie miały istotnego wpływu na moją ocenę całej rozprawy.

Reasumując stwierdzam, że – w mojej opinii – przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgra Adama Krysztofika z nadwyżką spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim i wnioskuję o:

- 1) dopuszczenie mgra Adama Krysztofika do dalszych etapów przewodu doktorskiego,
- 2) wyróżnienie przygotowanej przez mgra Adama Krysztofika rozprawy doktorskiej.

