

Załącznik 2 do Wniosku Ryszarda Gieniusza o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego

**Autoreferat
przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych**

2.1 Imię i nazwisko	2
2.2 Posiadane dyplomy, stopnie naukowe	2
2.3 Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych	2
2.4 Wskazanie osiągnięcia stanowiącego podstawę postępowania habilitacyjnego	2
2.4A. Wykaz prac stanowiących jednotematyczny cykl publikacji	2
2.4B. Omówienie celu naukowego prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania	4
2.5 Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych	16
2.5A. Osiągnięcia w pracy naukowej przed uzyskaniem stopnia doktora	16
2.5B. Osiągnięcia w pracy naukowej po uzyskaniu stopnia doktora	17

Autoreferat

przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych

2.1 Imię i nazwisko: Ryszard Gieniusz

2.2 Posiadane dyplomy, stopnie naukowe (nazwa, miejsce i rok uzyskania)

magister Filia Uniwersytetu Warszawskiego w Białymstoku, Wydział Matematyczno-Fizyczny, 1977 r. Praca magisterska pt. „*Badanie struktur domenowych jako funkcji temperatury w ferrimagnetykach o jednoosiowej anizotropii*” wykonana w Pracowni Fizyki Magnetyków Wydziału Matematyczno-Przyrodniczego Filii Uniwersytetu Warszawskiego w Białymstoku (obecnie Zakład Fizyki Magnetyków, Wydział Fizyki Uniwersytetu w Białymstoku) pod opieką prof. dr hab. Henryka Szymczaka

doktor nauk fizycznych

Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie, 1990 r. Praca doktorska pt. „*Magnetostatyczne drgania własne w warstwach granatów $Y_3Fe_5O_{12}$ z uwzględnieniem anizotropii kubicznej i jednoosiowej*” wykonana pod kierunkiem prof. dr hab. Ritty Szymczak.

2.3 Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

1977 - 1978	asystent stażysta, Zakład Fizyki, Filia Uniwersytetu Warszawskiego w Białymstoku,
1978 - 1979	samodzielny fizyk, Pracownia Fizyki Magnetyków, Katedra Fizyki, Filia Uniwersytetu Warszawskiego w Białymstoku,
1980 - 1987	starszy asystent, Pracownia Fizyki Magnetyków (obecnie Zakład Fizyki Magnetyków), Katedra Fizyki, Filia Uniwersytetu Warszawskiego w Białymstoku,
1987 - 1992	specjalista naukowo-techniczny, od 1987 do 1991- Katedra Fizyki Filii Uniwersytetu Warszawskiego w Białymstoku, od 1991 do 1992 - Instytut Fizyki Filii Uniwersytetu Warszawskiego w Białymstoku,
1992 - 2001	adiunkt, od 1992 do 1997- Instytut Fizyki Filii Uniwersytetu Warszawskiego w Białymstoku, od 1997 do 1999 - Instytut Fizyki Uniwersytetu w Białymstoku, od 1999 do 2001 - Instytut Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu w Białymstoku,
Od 2001	starszy wykładowca, od 2001 do 2008 - Instytut Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu w Białymstoku, od 2008 Wydział Fizyki Uniwersytetu w Białymstoku.

2.4 Wskazanie osiągnięcia stanowiącego podstawę postępowania habilitacyjnego

Osiągnięciem naukowym wynikającym z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym zgłoszonym do postępowania habilitacyjnego jest jednotematyczny cykl publikacji złożony z 9 prac. Tematem tego cyklu są „**Badania mikrofalowych wzbudzeń namagnesowania w wybranych strukturyzowanych i jednorodnych cienkich materiałach magnetycznych**”

2.4A Spis prac stanowiących podstawę postępowania habilitacyjnego

- H1.** Resonant frequency multiplication in microscopic magnetic dot
V. E. Demidov, H. Ulrichs, S. Urazhdin, S. O. Demokritov, V. Bessonov, **R. Gieniusz**,
A. Maziewski
Appl. Phys. Lett., 99, 012505 (2011)
- H2.** Single antidot as a passive way to create caustic spin-wave beams in yttrium iron garnet films
R. Gieniusz, H. Ulrichs, V. D. Bessonov, U. Guzowska, A. I. Stognii, A. Maziewski
Appl. Phys. Lett., 102, 102409 (2013)
- H3.** An antidot array as an edge for total non-reflection of spin waves in yttrium iron garnet films
R. Gieniusz, V. D. Bessonov, U. Guzowska, A. I. Stognii, A. Maziewski,
Appl. Phys. Lett., 104, 082412 (2014)
- H4.** Cubic and uniaxial anisotropy effects on magnetostatic modes in (111)-oriented yttrium iron garnet films
R. Gieniusz,
J. Magn. Magn. Mater., 119, 187 (1993)
- H5.** Microwave excitations in Bi-doped garnet films
R. Gieniusz, J. M. Desvignes, R. Jabłoński,
J. Magn. Magn. Mater., 153, 50 (1996)
- H6.** FMR study of ultrathin Co magnetic films on vicinal Si (111) substrates
R. Gieniusz, A. Stupakiewicz, O. Liedke, A. Maziewski, P. Gogol, P. Beauvillain
J. Magn. Magn. Mater., 272, 911 (2004)
- H7.** Brillouin light scattering investigations of magnetic and elastic properties in MBE grown trilayer Mo/Co/Au systems
R. Gieniusz, T. Błachowicz, A. Maziewski, A. Petroutchik, L.T. Baczewski, A. Wawro,
J. Hamrle, O. Serga, B. Hillebrands,
Acta Physica Polonica A, 115, 213 (2009)
- H8.** Magnetic anisotropy FMR studies of thin and ultrathin Co films grown between Mo, Au buffer and overlayers
R. Gieniusz, L. T. Baczewski, Z. Kurant, A. Maziewski, A. Wawro
J. Magn. Magn. Mater., 310, 2198 (2007)
- H9.** Formation of cobalt/garnet heterostructures and their magnetic properties
M. Pashkevich, **R. Gieniusz**, A. Stognij, N. Novitskii, A. Maziewski, A. Stupakiewicz,
Thin Solid Films 556, 464 (2014)

2.4B Omówienie celu naukowego wyżej wymienionych prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

Celem naukowym prezentowanego w opisie cyklu prac stanowiących podstawę postępowania habilitacyjnego było zbadanie mikrofalowych wzbudzeń namagnesowania w wybranych strukturyzowanych i jednorodnych cienkich warstwach magnetycznych. Na własności opisanych efektów istotny wpływ mają parametry próbek, takie jak anizotropia magnetyczna oraz stałe tłumienia i dlatego znaczną część rozprawy stanowią pomiary tych wielkości fizycznych. Prezentowane w opisie badania wzbudzeń namagnesowania, mają fundamentalne znaczenie poznawcze w fizyce strukturyzowanych materiałów i nie były dotychczas dostatecznie zbadane. Badania te są szczególnie ważne, ponieważ wiążą się np. z poszukiwaniem nowego sposobu przetwarzania i przekazywania informacji bez konieczności przenoszenia ładunków.

Magnetostatyczne fale spinowe (MSSW) [L1], wykorzystywane w urządzeniach wysokiej częstotliwości charakteryzują się szeregiem niezwykłych właściwości, zasadniczo różniących je od innych fal (w tym elektromagnetycznych), takich jak:

- i) nieliniowa dyspersja i niezamknięte krzywe $k_x(k_y)$ o stałej częstotliwości,
- ii) silnie anizotropowy charakter propagacji, spowodowany zewnętrznym polem magnetycznym prowadzący do tego, że wektory prędkości fazowej i grupowej nie są, w ogólności, do siebie równoległe,
- iii) niewzajemność, oznaczająca zmianę kierunku propagacji i charakteru fal przy zmianie zwrotu pola magnetycznego,
- iv) możliwość kontrolowania charakterystyki dyspersyjnej zarówno zewnętrznym polem magnetycznym jak i geometrią próbki oraz jej strukturyzacją.

Własności te prowadzą do znanych z literatury efektów takich jak pojawienie się niedyfrakcyjnej zogniskowanej wiązki fal spinowych oraz ujemnego współczynnika załamania [L2,L3].

Wzbudzenia namagnesowania, zarówno w postaci fal stojących jak i propagujących się magnetostatycznych fal spinowych w jednorodnych próbkach mogą być jednocześnie skutecznym narzędziem do pomiaru parametrów materiałowych takich jak anizotropia magnetyczna czy stałe tłumienia. MSSW są przedmiotem intensywnych badań ze względu na ich potencjalne zastosowanie w takich urządzeniach jak filtry, sensory pola magnetycznego czy deflektory [L4].

Struktury magnoniczne

Struktury magnoniczne, zwane także kryształami magnonicznymi, jako odpowiedniki kryształów fotonicznych, fononicznych czy plazmonicznych, są to układy elementów magnetycznych, których okresowy lub nieokresowy charakter, określa widmo wzbudzeń spinowych [L5-L7]. Najprostszym strukturyzowanym układem magnetycznym, w którym można wzbudzać zlokalizowane drgania namagnesowania jest pojedyncza kropka, np. w postaci submikronowych rozmiarów dysku z permaloju. Wówczas rozmiary obiektu są znacznie mniejsze niż długość wzbudzającej fali. W przypadku poruszających się MSSW najprostszą strukturyzacją jest pojedynczy otworek w materiale magnetycznym, na którym fala ta ulega rozproszeniu. Bardziej złożoną strukturę stanowi linia otworków lub ich układ 2D na powierzchni próbki. Na efekty rozpraszania MSSW w takich układach, istotny wpływ mają parametry strukturyzacji takie jak kształt i wielkość otworków oraz ich okres, częstotliwość i amplituda wzbudzeń, wartość i kierunki zewnętrznego pola magnetycznego przykładanego w odniesieniu do strukturyzacji próbek. Istotne są również rodzaje oddziaływań magnetycznych wynikające z parametrów magnetyka, co bezpośrednio wpływa na zależności dyspersyjne MSSW.

Badane materiały

Jednym z głównych zadań w badaniach wzbudzeń namagnesowania w strukturyzowanych układach jest dobór materiału, w którym się one rozchodzą, ze względu na stałą tłumienia Gilberta. Wielkość tłumienia określa drogę, na której możliwa jest obserwacja propagacji wzbudzeń namagnesowania w materiale magnetycznym. W poszukiwaniu kandydatów ośrodków o optymalnych własnościach wzbudzeniowych badane były trzy grupy materiałów: cienkie warstwy granatów, permaloju i kobaltu oraz hetero-struktury kobalt/granat.

W grupie dielektryków powszechnie stosowanym w badaniu zjawisk mikrofalowych jest granat itrowo-żelazowy (YIG) a w grupie metali, permaloj (Py). Niewielki współczynnik tłumienia w warstwach YIG pozwala na obserwację MSSW na drodze rzędu kilku milimetrów. Dla porównania, w permaloju fale te propagują się na odległość rzędu kilkunastu mikrometrów. Cienkie warstwy YIG, materiału znanego z rekordowo niskiego współczynnika tłumienia Gilberta w zakresie mikrofal, charakteryzują się jednak niewielkim skręceniem Faradaya. Poprawę tego parametru uzyskuje się poprzez domieszkowanie granatu odpowiednimi pierwiastkami, w tym bizmitem (YIG:Bi), co jednak prowadzi do wzrostu współczynnika tłumienia w porównaniu do czystego YIG. W prezentowanym cyklu prac badano wzbudzenia namagnesowania w próbkach YIG [H2÷H4] na podłożu $Gd_3Ga_5O_{12}$ (GGG) o kierunku wzrostu [111] uzyskane metodą epitaksji z fazy ciekłej (LPE). Strukturyzację w tych materiałach w postaci pojedynczego otworka, linii otworków oraz układu 2D otworków wykonano metodą wytrawiania jonowego w The Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (Białoruś) w Mińsku.

W grupie metali, permaloj jest materiałem znanym z prostej technologii wytwarzania oraz łatwej strukturyzacji, charakteryzuje się jednak znacznie większą stałą tłumienia w porównaniu do warstw YIG. Jednak, z punktu widzenia zastosowań w mikroelektronice jako elementy logiczne i sterujące, dąży się do miniaturyzacji układów do wielkości rzędu submikrometrów. A wówczas nawet przy większej stałej tłumienia w takim materiale możliwa jest obserwacja wzbudzeń namagnesowania. Przykładem, są eliptyczne kropki z permaloju, których strukturyzację wykonano metodą litografii elektronowej i wytrawiania jonowego w Department of Physics, Emory University (USA) w Atlancie. Badania wzbudzeń namagnesowania w powyższych próbkach przedstawione są w publikacji [H1]. W innych materiałach metalicznych drogi propagacji fal spinowych są jeszcze krótsze, sięgające jedynie rzędu mikrometrów lub submikrometrów [L8].

Dla wzbudzeń mikrofalowych interesującym materiałem jest również cienkowarstwowy metaliczny kobalt, (Co), z możliwością łatwej zmiany anizotropii magnetycznej. Modyfikację tego parametru można przeprowadzić poprzez chemiczny dobór nieferromagnetycznego podłoża i warstwy przykrywającej lub w wyniku strukturyzacji podłoża (np. osadzenie kobaltu na podłożu schodkowym [H6]).

Wyniki badań w warstwach ultracienkiego kobaltu typu X/Co/Y, gdzie X i Y oznaczają nieferromagnetyczne warstwy molibdenu (Mo), lub złota (Au) przedstawiono w publikacjach [H7,H8]. Warstwy te zostały wytworzone metodą epitaksji z wiązek molekularnych (ang. molecular beam epitaxy - MBE) w ultrawysokiej próżni w Instytucie Fizyki PAN w Warszawie oraz w Institute of Fundamental Electronics (IEF) w Orsay (Francja). Proces wzrostu wszystkich warstw i skład chemiczny próbek były kontrolowane *in-situ* przy pomocy standardowych technik, takich jak RHEED (ang. reflection high-energy electron diffraction), LAXRD (ang. low angle X-ray diffraction) oraz AES (ang. Auger electron spectroscopy).

Próbą połączenia właściwości warstw granatów i magnetycznego metalu są hetero-struktury Co/YIG. Badanie hetero-struktur jest również przedmiotem niniejszej rozprawy [H9].

Aparatura pomiarowa

Prezentowane w rozprawie zasadnicze wyniki eksperymentalne otrzymano z wykorzystaniem trzech układów pomiarowych:

- i) spektrometru niesprężystego rozpraszania światła Brillouina (BLS) w trzech konfiguracjach: klasyczny układ BLS oraz spektrometr BLS z rozdzielczością czasowo-przestrzenną w dwóch opcjach (BLS w konfiguracji transmisyjnej oraz mikroBLS),
- ii) spektrometru rezonansu ferromagnetycznego (FMR),
- iii) mikrofalowego analizatora widma.

Poniżej krótko je scharakteryzuję.

I. Spektrometr BLS

• klasyczny układ BLS

Rozpraszanie światła Brillouina jest lokalną optyczną metodą badania akustycznych kwazicząstek takich jak fonony i magnony. W języku fizyki kwantowej, BLS jest to niesprężyste rozpraszanie fotonów na tych kwazicząstkach przy spełnieniu zasady zachowania energii i pędu. W wyniku anihilacji kwazicząstki, czyli „anti-Stokes process”, rozproszony foton zyskuje energię i pęd. „Stokes process”, czyli kreacja, kwazicząstki następuje w wyniku pobrania energii i pędu od fotonu. W temperaturze pokojowej ($T \gg \hbar\omega/k_B \approx 1K$) oba procesy są jednakowo prawdopodobne [L9]. Typowa wielkość przesunięcia częstości promieniowania elektromagnetycznego przy rozpraszaniu BLS w wyniku kreacji bądź anihilacji magnonu jest rzędu pojedynczych GHz i wynika z wartości częstości wzbudzeń biorących w nim udział. Pomiar tak niewielkiego przesunięcia częstości możliwy jest, jeśli użyjemy:

- i) monochromatycznego źródła światła o niewielkiej szerokości linii $\Delta\nu$,
- ii) interferometru z ekstremalnie wysoką rozdzielczością.

Z tego względu, we współczesnych spektrometrach BLS wykorzystuje się, wieloprześciowe interferometry Fabry-Perota w układzie podwójnym (Sandercock Scientific Instruments) charakteryzujące się bardzo wysokim kontrastem 10^{10} oraz rozdzielczością częstości większą niż 100 MHz [L10]. Wyniki eksperymentalne przedstawione w niniejszym opisie zostały otrzymane na układzie BLS, w którym zastosowano jednomodowy laser Spectra Physics Excelsior o szerokości linii $\Delta\nu$ mniejszej niż 10 MHz i mocy 200 mW, emitujący falę świetlną o długości 532 nm. Klasyczny układ BLS pracujący w konfiguracji rozpraszania zwrotnego (ang. backscattering geometry) pozwalał na pomiary wektora falowego i częstości, odpowiednio w zakresach $(0 \div 2.3) \cdot 10^5 \text{ cm}^{-1}$ i $(1 \div 100) \text{ GHz}$.

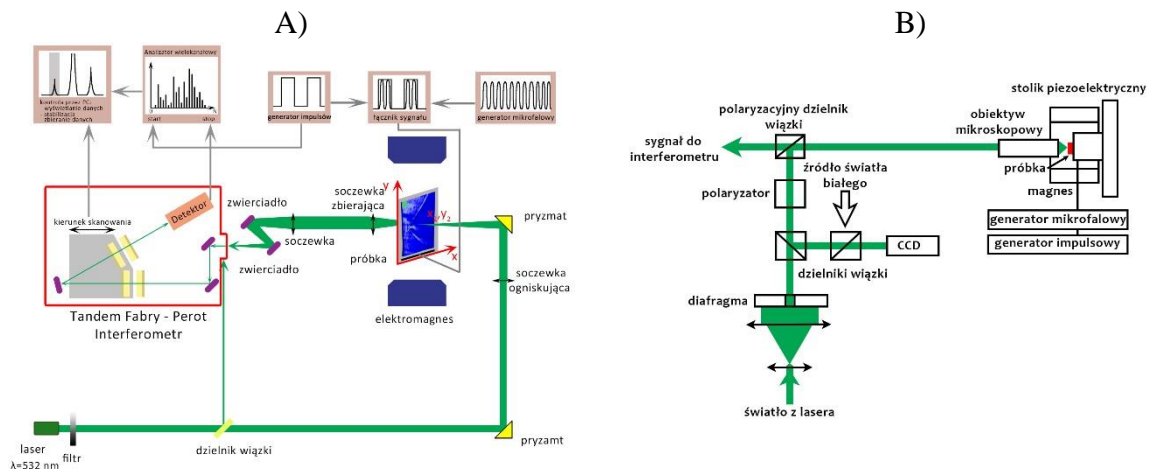
Widmo BLS w warstwach kobaltu o strukturze Mo/Co/Au zmierzono klasycznym układem BLS w Department of Physics, The University of Kaiserslautern (Niemcy).

• Spektrometry BLS z rozdzielczością czasowo-przestrzenną [L9]:

- BLS w konfiguracji transmisyjnej (rys. 1A)

Na rys. 1a) przedstawiono schemat układu BLS w konfiguracji transmisyjnej pozwalający na badanie propagujących się fal spinowych wzbudzanych anteną mikropaskową zasilaną z generatora mikrofalowego. Układ ten umożliwia analizę wzbudzeń magnetycznych w ośrodkach przezroczystych dla światła widzialnego z rozdzielczością przestrzenną realizowaną systemem precyzyjnych mechanicznych przesuwów 2D. Rozdzielczość czasową uzyskuje się poprzez zastosowanie metody czasowo-skorelowanego zliczania pojedynczych fotonów (ang. time-correlated single-photon counting) [L9]. W układzie tym mierzony sygnał BLS jest proporcjonalny do kwadratu składowej dynamicznej namagnesowania, w określonym przez zogniskowaną plamkę świetlną miejscu na powierzchni badanej próbki.

Natomiast system przesuwów 2D pozwala na precyzyjne ustawienie miejsca pomiaru badanego obiektu i rejestrację natężenia MSSW w próbkach o wielkości około 2 mm x 2 mm, z krokiem do 1 μm . Przy pomocy opisywanego układu BLS dokonano wizualizacji i pomiarów rozpraszania MSSW na pojedynczym otworze oraz linii otworków w warstwie YIG. Pomiary te wykonano na układzie BLS znajdującym się w Zakładzie Fizyki Magnetyków (ZFM) Wydziału Fizyki Uniwersytetu w Białymstoku.



Rys. 1 Schematy układów BLS z rozdzielczością czasową-przestrzenną w opcji: A) transmisyjnej układu z ogniskowaniem wiązki laserowej do rozmiarów ok. 40 μm ; B) odbiciowej układu „mikroBLS”, umożliwiającej pomiary z rozdzielczością około 250 nm (przy wykorzystaniu obiektywu mikroskopowego) [L11].

- mikroBLS (rys. 1B)

Układ ten pracujący w konfiguracji odbiciowej pozwala na pomiary oraz wizualizację wzbudzeń namagnesowania w obiektach o rozmiarach submikronowych. Zastosowano w nim specjalny obiektyw mikroskopowy o 100-krotnym powiększeniu i aperturze numerycznej 0.75 umożliwiający zogniskowanie wiązki światła laserowego do średnicy około 300 nm. Podgląd mikroskopowy badanego obszaru próbki oraz system 3D piezo przesuwów pozwala na precyzyjny wybór miejsca pomiarów a aktywny układ korekty położenia umożliwia kontrolę miejsca badanego obiektu i niwelację dryftu termicznego w trakcie pomiarów. Badanie nieliniowych wzbudzeń namagnesowania w eliptycznych dyskach z permalaju wykonano na podobnych układach mikroBLS w Institute of Applied Physics Westfaelische Wilhelms-Universitaet Muenster (Niemcy) i w ZFM w Białymstoku. Badanie rozpraszania MSSW na strukturyzowanych warstwach granatów wykonano na układzie mikroBLS w ZFM wUwB.

II. Spektrometr rezonansu ferromagnetycznego (FMR)

Spektrometr FMR na pasmo X (ok. 9.5 GHz) z odbiciową wnąką rezonansową typu TE_{102} , umożliwia pomiary właściwości magnetycznych próbek w temperaturze pokojowej w polu magnetycznym do 1T. Badania anizotropii magnetycznej oraz stałej tłumienia w warstwach YIG, YIG:Bi oraz hetero-strukturach Co/YIG wykonano z wykorzystaniem spektrometru FMR znajdującego się w ZFM w Białymstoku. Z wykorzystaniem tego układu analizowano także wpływ rodzaju podłoża i przykrycia warstw kobaltu na anizotropię magnetyczną w kobalcie. Natomiast temperaturowe pomiary anizotropii magnetycznej oraz

szerokości linii rezonansowej ΔH_{FMR} w warstwach YIG:Bi wykonano spektrometrem FMR w Zakładzie Epitaksji Instytutu Technologii Materiałów Elektronicznych (ITME) w Warszawie.

III. Mikrofalowy analizator widma

Badanie biegnących MSSW odbywało się w układzie z anteną nadawczą wzbudzającą fale spinowe i zasilaną z generatora wysokiej częstotliwości. W odległości kilku milimetrów znajdowała się antena odbiorcza, z której sygnał, rejestrujący dochodzące do niej wzbudzenia namagnesowania, podawany był następnie do mikrofalowego analizatora widma [L12]. Układ pozwalał na pomiary charakterystyk transmisyjnych w funkcji częstotliwości f bądź pola magnetycznego H . Metodą tą badano propagujące się fale spinowe w próbkach YIG i YIG:Bi. Pomiary zostały wykonane w ZFM w Białymstoku.

W celu interpretacji wyników eksperymentalnych przeprowadzono **modelowanie rozkładów namagnesowania** w oparciu o program do symulacji mikromagnetycznych OOMMF. (ang. Object Oriented Micro Magnetic Framework).

Dalszy opis autoreferatu podzielono na dwie części.

Pierwszą, zasadniczą stanowią badania: i) liniowych i nieliniowych wzbudzeń namagnesowania w pojedynczym, submikronowych rozmiarów, dysku z permaloju [publikacja **H1**], ii) rozpraszania biegnących magnetostaticznych fal spinowych na pojedynczym otworze oraz na linii otworków w cienkich warstwach YIG [publikacje **H2,H3**].

Drugą część rozprawy stanowią badania wzbudzeń namagnesowania w jednorodnych warstwach YIG, YIG:Bi oraz hetero-strukturach Co/YIG [publikacje **H4,H5,H9**], z których wyznaczono anizotropię magnetyczną oraz parametry propagacyjne MSSW. Ponadto, w ultracienkich warstwach kobaltu badano wpływ otoczenia warstw niemagnetycznych, w tym strukturyzowanego podłoża schodkowego, na wielkość anizotropii jednoosiowej [publikacje **H6-H8**].

Badanie wzbudzeń namagnesowania w strukturyzowanych materiałach techniką BLS [H1-H3].

W pierwszym etapie uruchamiania skomplikowanego spektrometru niesprężystego rozpraszania światła Brillouina, obiektem badań były eliptyczne dyski z permaloju rozmiarów submikronowych. Celem badań opisanych w pracy [H1] było zaobserwowanie nieliniowych harmonicznych wzbudzeń namagnesowania, które pojawiają się przy dużej amplitudzie pola mikrofalowego. Jest to powszechnie obserwowany nieliniowy efekt znany również dla innego rodzaju wzbudzeń. W przypadku ośrodków magnetycznych generacja częstotliwości harmonicznych wynika z równania Landau-Lifszica [L13]. Efekt ten wraz z obserwacją drugiej harmonicznej badano wcześniej przy propagacji fal spinowych w mikroskopowych rozmiarów falowodzie Py [L14]. W pracy [H1] analizowano dynamikę namagnesowania w eliptycznym dysku z permaloju o rozmiarach 1000 nm na 500 nm (w układzie współrzędnych x, y wzdłuż odpowiednio, wielkiej i małej osi elipsy). Badany obiekt umieszczony był na przewodzącym mikropasku zasilanym prądem z generatora mikrofalowego. Zewnętrzne stałe pole magnetyczne H przyłożone było wzdłuż mikropaska i wielkiej osi elipsy. Podawany do mikropaska impulsowy sygnał z generatora mikrofalowego wzbudzał dynamiczne pole magnetyczne h prostopadłe do stałego zewnętrznego pola H . Detekcja dynamicznego namagnesowania odbywała się układem mikroBLS poprzez skanowanie plamką światła laserowego płaszczyzny badanej próbki.

Drgania normalne układu analizowano ustawiając plamkę świetlną w centralnym miejscu elipsy Py a natężenie sygnału BLS mierzono w funkcji częstotliwości f . Przy

niewielkiej mocy mikrofalowej $P=100 \mu\text{W}$, w polu $H=900 \text{ Oe}$ zmierzono krzywą rezonansową, której maksimum było dla częstotliwości $f_0=9.3 \text{ GHz}$. Mapa natężenia BLS(x,y) obszaru elipsy P_y wykonana dla f_0 wykazuje maksimum w jej centrum. Wzbudzone drgania namagnesowania z inną częstotliwością niż f_0 charakteryzowały się znacznie mniejszym natężeniem z wyraźnie rozmytym maksimum.

Nieliniowe dynamiczne procesy wzbudzeń badano przy dużej mocy ($P=50 \text{ mW}$) generatora mikrofalowego. Drugą harmoniczną wzbudzano kierując plamkę światła laserowego w okolice ogniska elipsy, częstotliwość wzbudzającą f wybrano równą w przybliżeniu połowie f_0 , a sygnał BLS mierzono przy częstotliwości $2f$. Otrzymana zależność natężenia sygnału BLS od częstotliwości $2f$ wykazywała dwa maksima przy $2f=9.1$ oraz 10.2 GHz , i obie były różne od częstotliwości f_0 . Mapy natężenia BLS wykonane dla powyższych dwóch częstotliwości pokazują po dwa maksima wzdłuż wielkiej osi elipsy. Rozkład natężenia dla większej częstotliwości $2f$ jest rozciągnięty wzdłuż małej osi elipsy, natomiast dla mniejszej częstotliwości $2f$ jest izotropowy. W celu wyjaśnienia pochodzenia obserwowanych rozkładów natężenia BLS przeprowadzono modelowanie wzbudzeń namagnesowania w oparciu o program do symulacji mikromagnetycznych OOMMF. Z symulacji wynika, że spektralny pik obserwowany przy $2f=9.1 \text{ GHz}$ związany jest z drganiami mającymi jeden węzeł na wielkiej osi elipsy P_y . Natomiast pik przy $2f=10.2 \text{ GHz}$ dotyczy drgań, które mają dwa węzły, jeden na małej osi i drugi na wielkiej osi elipsy. Maksima natężenia dla większej częstotliwości $2f$ są rozciągnięte w kierunku małej osi elipsy zamiast oczekiwanego węzła na jej wielkiej osi. Przypuszczalnie wynika to z ograniczonej rozdzielczości układu pomiarowego. Analiza efektywności generacji drugiej harmonicznej wykazała, że zmieniając moc P , zależność natężeń I_{2f} i I_f ma charakter kwadratowy, tj. $I_{2f} \sim (I_f)^2$, dla obu częstotliwości $2f$. Ze wzrostem mocy P , rośnie też stosunek I_{2f}/I_f , osiągając maksymalną zmierzoną (przy dostępnym zakresie mocy) wartość 0.1 dla $P=100 \text{ mW}$.

Badanie trzeciej harmonicznej odbywało się w ten sposób, że drgania namagnesowania wzbudzano z częstotliwością generatora f a sygnał BLS mierzono dla częstotliwości $3f$. Natężenie mierzonego sygnału BLS w funkcji częstotliwości wykazuje maksimum przy $3f=9.3 \text{ GHz} = f_0$. Mapa natężenia wzbudzeń namagnesowania przy częstotliwości $f=3.1 \text{ GHz}$ i detekcji sygnału BLS dla $3f$ charakteryzuje się pojedynczym maksimum w centrum elipsy i jest podobna do otrzymanej dla wzbudzenia podstawowego. W przeciwieństwie do drugiej harmonicznej, trzecia harmoniczna zachowuje symetrię rozkładu przestrzennego wzbudzenia podstawowego. Analiza efektywności generowania trzeciej harmonicznej pokazuje, że natężenia I_{3f} i I_f skalują się zależnością: $I_{3f} \sim (I_f)^3$. Natomiast stosunek natężeń I_{3f}/I_f zmienia się w zakresie od 0.06 (dla mocy 1 mW) do 4.1 (dla 100 mW). Wyniki te wskazują, że maksymalna wartość natężenia trzeciej harmonicznej jest o jeden rząd wielkości większa niż drugiej harmonicznej i powyżej pewnej mocy P jest większa od natężenia drgania podstawowego.

W literaturze [L15,L16] obserwowano tzw. „aktywne źródło” formowania się samo-ogniskujących MSSW (ang. „caustic lines”) przy przejściu tych fal z falowodu, do „nieskończonej” próbki. Efekt ten pojawia się dla ściśle określonych wartości częstości f i pola magnetycznego H i wynika z własności ich charakterystyk dyspersyjnych MSSW [L17]. Jednak praktyczna realizacja aktywnego źródła samo-ogniskujących się fal spinowych jest trudna ze względu na konieczność specjalnego przygotowania próbek pomiarowych.

Celem badań opisanych pracy [H2] było określenie, czy podobny efekt można otrzymać przy dyfrakcji MSSW na pojedynczym otworze w materiale magnetycznym, który jest odwrotną strukturyzacją do magnetycznej kropki, jako biernym źródle „caustic lines”. W pracy [H2] przeanalizowano zjawisko rozpraszania MSSW na pojedynczym otworze w warstwie granatu w funkcji wzajemnej relacji długości fali spinowej λ do średnicy otworu d . Magnetostatyczne powierzchniowe fale spinowe wzbudzano anteną mikrofalową o szerokości

50 μm umieszczoną w odległości około 0.4 mm od otworka o średnicy $d=50 \mu\text{m}$ znajdującego się w próbce YIG. Stałe pole magnetyczne H przykładano w płaszczyźnie próbki równoległe do anteny. Wizualizację obrazów dyfrakcyjnych MSSW na otworku wykonano przy pomocy układu BLS w konfiguracji transmisyjnej w funkcji częstotliwości f i wielkości pola magnetycznego H . Wykonano serię map (x, y) dla pola $H=980 \text{ Oe}$ w zakresie częstotliwości f od 4.59 do 4.91 GHz. Na mapach widoczny był obszar próbki przed i za otworkiem. Z zależności dyspersyjnej MSSW wyliczono opowiadające częstotliwościom f wektory falowe k , z których wyznaczono długości fal zgodnie ze wzorem $\lambda=2\pi/k$. W zakresie badanych częstotliwości f , stosunek długości fali λ do średnicy otworka d , λ/d zmienia się od 14 do 2. Ze wzrostem częstości obrazy dyfrakcyjne zmieniają się i wyniki dla trzech wybranych wartości są następujące:

- i) Dla częstotliwości $f=4.62 \text{ GHz}$ ($\lambda/d=14$), fala spinowa o znacznie większej długości niż średnica otworka oddziałuje z prawie punktowym defektem, widoczne są dwie odbite na otworku wiązki fal skierowane w kierunku anteny nadawczej. Za otworkiem, w tym samym kierunku, co fala odbita obserwuje się dwa osłabienia (cienie).
- ii) Przy częstotliwości $f=4.73 \text{ GHz}$ ($\lambda/d=4.3$), pomiędzy anteną a otworkiem widoczna jest fala stojąca zamiast, zaobserwowanych wcześniej, dwóch intensywnych odbitych wiązek. Za otworkiem, dla tej częstotliwości widać najpierw linię osłabienia fal a dalej samo-ogniskującą się wiązkę o dużym natężeniu („caustic lines”).
- iii) Dla częstotliwości $f=4.85 \text{ GHz}$ ($\lambda/d=2$), za otworkiem widoczne są samo-ogniskujące się wiązki fal o dużym natężeniu, przechodzące w podwójne linie.

Dla większych częstotliwości f , w obszarze pomiędzy anteną a otworkiem obserwowane jest formowanie się fal stojących o długości λ_s wewnątrz stożka utworzonego z wiązek dyfrakcyjnych. Długości stojących fal λ_s odczytane z map zgadzają się z wartościami λ wyliczonymi z zależności dyspersyjnej, przy czym, ze wzrostem częstotliwości, długości tych fal maleją.

Fala spinowa w wyniku dyfrakcji na pojedynczym otworku widoczna jest na mapach BLS w postaci dwu wiązek tworzących kąt θ z normalną do pola magnetycznego H . Pomiarzy kąta θ wskazują, że rośnie on liniowo wraz ze wzrostem częstotliwości f . W celu wyjaśnienia tej zależności wyrysowano krzywe $k_x(k_y)$ o stałej częstotliwości f w zakresie od 4.6 do 4.9 GHz. Zmierzone kąty, jakie tworzą wektory prędkości grupowej z normalną do pola H , w obszarach gdzie zależności $k_x(k_y)$ są zbliżone do prostych. Przy wzroście częstotliwości f zwiększa się nachylenie prostoliniowych odcinków $k_x(k_y)$ i następuje wzrost pochodnej dk_x/dk_y . Prowadzi to do wzrostu kąta pomiędzy wektorem prędkości grupowej i normalną do pola H . Odczytane z zależności $k_x(k_y)$ kąty dyfrakcji θ rosną ze wzrostem częstotliwości f , lecz ich wartości są znacznie większe w porównaniu do wyników doświadczalnych.

Aby wyjaśnić eksperymentalną zależność $\theta(f)$ oraz mapy dyfrakcji, przeprowadzono obliczenia numeryczne, w których zastosowano teorię MSSW oraz zasadę Huygensa. Wprowadzony współczynnik kształtu ρ określa preferencję wektorów falowych o kierunkach bliskich prostopadłego do anteny. Warunek, że MSSW po dojściu do przeszkody zmienia fazę o π , konieczny jest dla znikania dynamicznego namagnesowania na granicy otworka. Otrzymane z obliczeń mapy dyfrakcji okazały się zbieżne z wynikami doświadczalnymi. Wyliczenia teoretyczne kątów θ wykazały zgodność z wynikami doświadczalnymi w granicach niepewności pomiarowych.

W pracy pokazano też, że kąt dyfrakcji θ mierzony względem kierunku pola H nie zmienia się, gdy obracamy antenę wzbudzającą fale. Wynika to z tego, że zależność dyspersyjna MSSW jest anizotropowa a kierunek prędkości grupowej określający propagację energii w ogólności nie jest równoległy do wektora falowego k . Obrót anteny i co za tym idzie zmiana kierunku wektora falowego k nie wpływa na kierunek wektorów prędkości

grupowej v_g gdyż zogniskowaną wiązkę dyfrakcyjną tworzą tylko v_g z odcinka prostoliniowego zależności $k_x(k_y)$.

Zjawisko odbicia powierzchniowych fal spinowych na krawędzi próbki analizowane było w pracach [L18,L19]. Z rozważań teoretycznych wynikało, że całkowite wewnętrzne odbicie tych fal pojawia się dla kąta krytycznego, θ_{kryt} mierzonego między krawędzią odbijającą a kierunkiem pola H, wówczas powinno się obserwować silnie zogniskowaną wiązkę fal spinowych o dużym natężeniu, propagującą się wzdłuż tej krawędzi.

W pracy [H3] przeprowadzono analizę propagacji MSSW w ośrodku modyfikowanym linią otworków. Celem badań opisanych w tej pracy była określenie, czy dla kąta krytycznego θ_{kryt} linia otworków może pełnić rolę krawędzi odbijającej i swego rodzaju „zwierciadła” magnetycznego kierującego wzdłuż niej fale spinowe. Badano próbki YIG o grubości $t=4.5 \mu\text{m}$ z linią otworków kołowych o średnicy $d=67 \mu\text{m}$ i kwadratowych o boku $d=67 \mu\text{m}$ przy różnych odległościach między otworkami oznaczonych jako okres strukturyzacji p . Przeprowadzono analizę oddziaływania MSSW z linią otworków w funkcji kąta θ pomiędzy linią otworków a polem magnetycznym H dla różnych wartości pola H i częstotliwości f . Fale spinowe wzbudzano anteną mikrofalową o szerokości $30 \mu\text{m}$. Mapy natężeniowe MSSW zostały wykonane z użyciem układu BLS w konfiguracji transmisyjnej z czasowo-przestrzenną rozdzielczością. Interpretację tego efektu również w tym przypadku wygodnie jest przeprowadzić posługując się zależnością $k_x(k_y)$, która jest krzywą podobną do hiperboli z dwiema asymptotami.

Jeśli MSSW odbija się od zwierciadła magnetycznego, którym może być krawędź próbki to kąt krytyczny, θ_{kryt} , pojawia się, gdy krawędź odbijająca jest prostopadła do jednej z asymptot krzywej $k_x(k_y)$. Wówczas żaden z rzutów wektora falowego MSSW padającego na krawędź zwierciadła nie przetnie krzywej odbicia zależności $k_x(k_y)$. Zakładając, że propagująca się w magnetyku MSSW zachowuje się jak fala świetlna w przezroczystym ośrodku i podlega prawom optyki geometrycznej, została obliczona zależność kąta krytycznego θ_{kryt} od częstotliwości f i pola H. Wynika z niej, że kąt krytyczny θ_{kryt} oraz zakres jego występowania rosną wraz ze wzrostem częstotliwości f i maleją ze wzrostem pola H. W pracy analizowano całkowite wewnętrzne odbicie fal spinowych na krawędzi próbki oraz linii otworków przy ich różnych kształtach oraz okresach p pomiędzy $104 \mu\text{m}$ i $257 \mu\text{m}$. Z analizy map BLS wynika, iż przy kącie krytycznym θ_{kryt} , emitowana przez antenę MSSW po dotarciu do linii otworków transformuje się w propagującą się wzdłuż niej równoległą wiązkę fal, o dużym natężeniu. Linia otworków może więc spełniać rolę krawędzi kierującej fale. Przy okresach mniejszych od długości fali wiązka ta jest prawie ciągła, a staje się nieciągła przy okresach większych od długości fali. Pomiar wykazały też, że przy kącie krytycznym θ_{kryt} , prędkość poruszania się wiązki fal wzdłuż otworków jest taka sama jak prędkość MSSW emitowanych przez antenę. Profile wiązek fal propagujących się wzdłuż krawędzi próbki i linii otworków zmierzone układem mikroBLS charakteryzowały się podobną szerokością. Wyniki symulacji mikromagnetycznych efektu całkowitego wewnętrznego odbicia MSSW na linii otworków okazały się również zgodne z wynikami doświadczalnymi.

Wzbudzenia namagnesowania w jednorodnych warstwach magnetycznych. Pomiary parametrów materiałowych technikami FMR i BLS [H4-H9].

Ważnymi parametrami określającymi przydatność materiału magnetycznego jako ośrodka do wzbudzania i propagacji fal spinowych są wielkości współczynnika tłumienia Gilberta α oraz anizotropii magnetycznej.

W pracy [H4] badano stojące mody magnetostatyczne z użyciem spektrometru FMR oraz biegnące fale spinowe za pomocą mikrofalowego analizatora widma. Celem badań było wyznaczenie anizotropii kubicznej i jednoosiowej cienkich warstw granatu YIG w geometrii

próbek, w których oś [111] była prostopadła do powierzchni. Analizowano próbki o grubości $7\mu\text{m}$ wycięte w kształcie prostokątów o wymiarach $1.29\text{ mm} \times 1.2\text{ mm}$ z krawędziami wzdłuż kierunków krystalograficznych [01-1] oraz [-211]. Z pomiarów FMR otrzymano widmo składające się z głównej linii rezonansu jednorodnego oraz dodatkowych linii, po obu stronach linii głównej, odpowiadające magnetostaticznym modom powierzchniowym i objętościowym. Zmierzone linie FMR odpowiadają wzbudzeniom o wektorach falowych związanych z liniowymi wymiarami badanej próbki. Dokonano dopasowania magnetycznych pól rezonansowych wyliczonych z teorii magnetostaticznych fal spinowych, w której uwzględniono anizotropię kubiczną i jednoosiową z eksperymentalnymi liniami FMR. Parametrami dopasowania były stałe anizotropii kubicznej i jednoosiowej. Wyliczone stałe anizotropii z dobrą dokładnością zgodziły się z literaturowymi wynikami uzyskanymi innymi metodami [L20].

W tej samej pracy [H4] wyznaczono też anizotropię kubiczną z pomiarów biegnących MSSW. W próbce wyciętej w kształcie okrągłego dysku o średnicy 2 cm , anteną nadawczą wzbudzano fale magnetostaticzne, które po dotarciu do odległej o 5 mm anteny odbiorczej były dalej mierzone mikrofalowym analizatorem widma. Wykonano pomiary charakterystyk transmisyjnych (ChT) [L12] w funkcji pola magnetycznego H (przy stałej częstotliwości f) dla różnych kątów φ w płaszczyźnie próbki. Z kątowej zależności ChT(φ) wynikało, że największą wartość wykazywała składowa pola magnetycznego o okresie 60° , z której wyliczono stałą anizotropii kubicznej. Wartość ta była zgodna z wynikami otrzymanymi innymi metodami [L20].

W pracy [H5] badano mikrofalowe wzbudzenia w warstwach granatów YIG domieszkowanych bizmutem (YIG:Bi). Celem badań była analiza wpływu warunków wzrostu warstw YIG:Bi na anizotropię magnetyczną oraz stałą tłumienia Gilberta α . Zbadano serię próbek o grubości od 1.7 do $10\mu\text{m}$ oraz o różnej prędkości wzrostu, od $0.88\mu\text{m}/\text{min}$ do $1.78\mu\text{m}/\text{min}$ w trakcie wytwarzania. Wykonano temperaturowe pomiary FMR, z których wyznaczono zależności pola anizotropii jednoosiowej oraz szerokości linii ΔH_{FMR} od temperatury. Zmierzona dla próbki o grubości $10\mu\text{m}$ zależność $\Delta H_{\text{FMR}}(T)$ wykazywała maksimum w pobliżu 50 K oraz prawie stałą wartość w zakresie temperatur od 100 do 300 K . Maksimum w pobliżu 50 K wyjaśniono przyjmując model klasycznej, powolnej relaksacji jonów żelaza Fe^{2+} [L21].

Parametry tłumienia badanych próbek wyznaczono także z pomiarów propagujących się fal magnetostaticznych układem anteny nadawczej i odbiorczej oraz mikrofalowego analizatora widma. Z drogi propagacji wzbudzeń namagnesowania wyznaczono stałą tłumienia Gilberta α w funkcji prędkości wzrostu kryształu. Najmniejszą wartość stałej α otrzymano dla próbki wytworzonej przy prędkości wzrostu kryształu $0.88\mu\text{m}/\text{min}$. Pomiary wykazały, że warstwy YIG domieszkowane bizmutem wytworzone w optymalnych warunkach wzrostu mogą charakteryzować się niewielką szerokością linii FMR. próbka o grubości $10\mu\text{m}$ miała szerokość linii $\Delta H_{\text{FMR}}=0.8\text{ Oe}$, czyli tylko około dwa razy większą w porównaniu do czystego YIG. W próbce o najmniejszym współczynniku tłumienia, przy dużej mocy mikrofalowej (15 mW), obserwowano nieliniowe wzbudzenia solitonowe [L22]. Z uzyskanych rezultatów wynika, że domieszkowanie YIG bizmutem, mimo, że nieznacznie zwiększa stałą tłumienia fal spinowych, jednak przy znacznym wzroście wartości skręcenia Faradaya, czyni te materiały bardzo atrakcyjnymi z punktu widzenia zastosowań w magnonice.

W pracach [H7,H8] badano jednorodne nanowarstwy kobaltu typu X/Co/Y, (gdzie X i Y oznaczają nieferromagnetyczne warstwy molibdenu (Mo) lub złota (Au)) z użyciem spektrometrów FMR oraz BLS. Badania miały na celu poznanie, jak wpływa chemiczny rodzaj podłoża i warstwy przykrywającej na anizotropię magnetyczną kobaltu. W pracy [H8], metodą FMR analizowano anizotropię magnetyczną w płaszczyźnie warstwy serii próbek

kobaltu o grubości od 1 do 6 nm przy różnej kombinacji pierwiastków, Au i Mo jako podłoże i przykrycie kobaltu. Z pomiarów wynika, że największe pole anizotropii w płaszczyźnie wykazywała próbka kobaltu mająca podłoże z molibdenu a przykrycie ze złota. Jej przyczyną była duża różnica w stałych sieci bcc podłoża z molibdenu oraz heksagonalnego kobaltu, powodująca pojawienie się naprężeń w kobalcie w trakcie jego wzrostu. Zmierzona maksymalna wartość pola anizotropii wyniosła około 1.5 kOe dla grubości kobaltu 2 nm wraz z dalszym wzrostem grubości kobaltu stopniowo zmniejszała się aż do wartości około 0.5 kOe. Przykrycie kobaltu od góry warstwą Mo spowodowało, że anizotropia ta znacznie zmalała w porównaniu do poprzedniego przypadku. Wynikało to przypuszczalnie z pseudomorficznego wzrostu Mo (sześciokrotna symetria Mo została zmierzona metodą RHEED).

Celem badań w pracy [H7] było wyznaczenie anizotropii magnetycznej kobaltu w układzie Mo/Co/Au oraz stałych sprężystości Mo, Co i Au. Próbki były mierzone klasycznym układem BLS oraz spektrometrem FMR. Z widma rozpraszania światła BLS na powierzchniowych falach magnetostatycznych określono częstości ich wzbudzeń, co pozwoliło na wyliczenie stałych anizotropii magnetycznej kobaltu. Wyniki otrzymane tą metodą były zgodne z rezultatami otrzymanymi z pomiarów FMR przedstawionymi w tej pracy. Wykonano również pomiary rozpraszania BLS na wzbudzeniach fononowych w tych próbkach. Z modów fononowych Rayleigha i Sezawy wyznaczono stałe sprężystości Mo, Co i Au, które okazały się zgodne z wynikami otrzymanymi innymi metodami [L20].

Oprócz sygnalizowanego wyżej składu chemicznego warstwy buforowej, na anizotropię magnetyczną nanowarstw kobaltu, istotny wpływ ma również struktura podłoża. Celem badań opisanych w pracy [H6] była analiza anizotropii magnetycznej w warstwach kobaltu, osadzonych na schodkowym podłożu krzemu Si(111) z 2° dezorientacją w kierunku [-1-12]. Złamanie symetrii translacyjnej podłoża Si wyidukowało dodatkową anizotropię „vicinal” w płaszczyźnie warstwy kobaltu [L23], którą wyliczono z widma FMR.

W pracy, [H9] badano hetero-struktury składające się z: (i) nanostruktury Co (o grubości od 1.2 nm do 3.6 nm) oraz (ii) warstwy granatu (o grubości kilku mikrometrów). Celem pomiarów zawartych w pracy [H9] była analiza właściwości magnetycznych i magnetoptycznych kobaltu oraz mechanizmów odpowiedzialnych za wielkości tych parametrów w układzie, Co/YIG. Wykonano pomiary magnetoptycznych efektów Kerra i Faradaya oraz widma FMR tych hetero-struktur w funkcji grubości warstwy kobaltu. Z pomiarów magnetoptycznych okazało się, że ze wzrostem grubości warstwy kobaltu w układzie, Co/YIG następuje wzrost efektywnej anizotropii magnetycznej oraz istotne zmniejszenie pola koercji. Wyniki pomiarów FMR pokazały, że stała tłumienia Gilberta α oraz anizotropia jednoosiowa kobaltu w tym układzie maleją liniowo ze wzrostem grubości kobaltu. Zmiany tych parametrów związane są z wielkością szorstkości warstwy pomiędzy metalem a granatem. Otrzymane w badaniach wartości parametrów tłumienia kobaltu znajdującego się w hetero-strukturach Co/YIG są porównywalne z parametrami charakteryzującymi pojedyncze nanowarstwy kobaltu osadzonego na metalicznych podłożach [L24].

Podsumowanie

W cyklu publikacji przedstawiono wyniki badań (eksperymentalnych i teoretycznych) mikrofalowych wzbudzeń namagnesowania w wybranych strukturyzowanych i jednorodnych cienkich warstwach magnetycznych. W badaniach uzyskano szereg interesujących wyników, dotyczących zachowania magnetostatycznych fal spinowych w układach o ograniczonych rozmiarach i poddanych strukturyzacji. Znaczna część przedstawionych badań dotyczy fundamentalnych zjawisk w magnetyzmie układów submikronowych i strukturyzowanych i ma istotne znaczenie poznawcze i aplikacyjne.

Do najważniejszych wyników zaliczam:

1. Dynamika namagnesowania w submikronowych rozmiarów dysku Py:

- Zobrazowanie i analiza rezonansowych wzbudzeń namagnesowania przy niewielkiej mocy mikrofalowej,
- Zaobserwowanie nieliniowych wzbudzeń drugiej harmonicznej przy dużej mocy mikrofalowej z charakterystycznym asymetrycznym rozkładem intensywności oraz wyjaśnienie przyczyn wzbudzonych modów przy użyciu symulacji mikromagnetycznych OOMMF, z których wynika, że
 - Pik obserwowany dla mniejszej częstotliwości związany jest ze wzbudzeniem cechującym się jednym węzłem na małej osi elipsy,
 - Pik przy większej częstotliwości wiąże się ze wzbudzeniem, które ma dwa węzły, jeden na małej osi elipsy a drugi na wielkiej osi elipsy,
- Zaobserwowanie i analizę wzbudzeń trzeciej harmonicznej, z pojedynczym pikiem spektralnym przy częstotliwości $3f$ równej częstotliwości f_0 wzbudzenia podstawowego z symetrycznym maksimum natężenia w centrum elipsy Py, podobnie jak we wzbudzeniu podstawowym,
- Wykazanie, że efektywność wzbudzania trzeciej harmonicznej jest o rząd wielkości większa od drugiej harmonicznej i nawet znacznie większa niż wzbudzenia podstawowego.

2. MSSW w warstwie YIG z pojedynczym otworkiem:

- Zobrazowanie dyfrakcji fal spinowych w funkcji częstotliwości f i przy różnym stosunku długości tej fali do wielkości otworka,
- Zaobserwowanie i wyjaśnienie rosnącej liniowej zależności kąta dyfrakcji θ od częstotliwości f ,
- Wyjaśnienie efektu stałości kąta dyfrakcji θ względem pola magnetycznego H przy obrocie anteny wzbudzającej fale spinowe,
- Zaproponowanie modelu numerycznego dyfrakcji fal spinowych na pojedynczym otworku, który w sposób zadawalający potwierdził i wyjaśnił wyniki doświadczalne,
- Otrzymanie, w wyniku dyfrakcji MSSW na pojedynczym otworku, samo-ogniskującej się wiązki fal o dużym natężeniu i niewielkim kącie rozbieżności oraz wyjaśnienie warunków jej powstawania,

3. MSSW w warstwie YIG strukturyzowanej linią otworków:

- Zobrazowanie, po raz pierwszy w literaturze, całkowitego wewnętrznego odbicia MSSW na krawędzi próbki oraz linii otworków i analiza tego efektu w funkcji parametrów linii otworków,
- Przeanalizowanie zależności kąta krytycznego θ_{kryt} od częstotliwości f i wielkości pola H ,
- Zastosowanie krzywych o stałej częstotliwości $k_x(k_y)$ do interpretacji wyników doświadczalnych,
- Obliczenie na podstawie symulacji mikromagnetycznych obrazów rozpraszania MSSW na linii otworków zgodnych z wynikami doświadczalnymi,

- Zaobserwowanie silnie zogniskowanej wiązki fal spinowych o dużym natężeniu, propagującej się wzdłuż linii otworków przy całkowitym wewnętrznym odbiciu na linii otworków jako krawędzi odbijającej fale oraz wyjaśnienie natury tych fal.

4. Wzbudzenia namagnesowania w jednorodnych warstwach magnetycznych. Pomiary parametrów materiałowych technikami FMR i BLS:

- Zaproponowanie metody wyznaczania magnetycznej anizotropii kubicznej i jednoosiowej na podstawie analizy stojących i propagujących się fal spinowych oraz określenie tych parametrów w warstwach YIG,
- Przeanalizowanie wpływu szybkości wzrostu i grubości próbki na stałe tłumienia w warstwach YIG:Bi oraz obserwacje w tym materiale nieliniowych wzbudzeń solitonowych przy dużej mocy generatora wzbudzającego fale,
- Zbadanie wpływu otoczenia pierwiastków niemagnetycznych na anizotropię w płaszczyźnie w cienkich warstwach kobaltu oraz wyjaśnienie mechanizmu powodującego ten efekt,
- Zaobserwowanie i analiza anizotropii typu "vicinal" w warstwach kobaltu osadzonego na schodkowym podłożu krzemu,
- Przeanalizowanie i wyjaśnienie wpływu parametrów powierzchni metal/granat i technologii preparacji hetero-struktur Co/YIG na właściwości kobaltu oraz zależności anizotropii i stałej tłumienia w kobaltcie od jego grubości.

Prezentowane w rozprawie badania wzbudzeń namagnesowania w strukturyzowanych materiałach magnetycznych mają fundamentalne znaczenie poznawcze w magnonice. Analizowane efekty mogą być fizyczną podstawą nowej koncepcji zastosowania wzbudzeń namagnesowania jako nośników informacji bez konieczności przenoszenia ładunków. Wiedza dotycząca właściwości opisanych wzbudzeń jest także ważna z punktu widzenia zastosowań w dziedzinie najnowszych osiągnięć nanotechnologii, takich jak nowej generacji układy do zapisu i odczytu informacji cyfrowej czy w urządzeniach i układach spintronicznych.

Literatura:

- L1.** R. W. Damon and J. R. Eshbach, *J. Phys. Chem. Solids*, 19, 308 (1961),
- L2.** S. Mansfeld, J. Topp, K. Martens, J. N. Toedt, W. Hansen, D. Heitmann, and S. Mendach, *Phys. Rev. Lett.* 108, 047204 (2012),
- L3.** T. Schneider, A. A. Serga, A. V. Chumak, C. W. Sandweg, S. Trudel, S. Wolff, M. P. Kostylev, V. S. Tiberkevich, A. N. Slavin, and B. Hillebrands, *Phys. Rev. Lett.* 104, 197203 (2010),
- L4.** *Magnonics: From Fundamentals to Applications*, Topics in Applied Physics Vol. 125, edited by S. O. Demokritov and A. N. Slavin (Springer, Berlin, 2013),
- L5.** M Krawczyk, H Puzkarski, *Physical Review B*, 77, 054437 (2008),
- L6.** Kruglyak V.V, Demokritov S.O, Grundler D *Magnonics J. Phys. D Appl. Phys.* 43, 264001 (2010),
- L7.** M. Krawczyk, D. Grundler, *J. Phys.: Condens. Matter.* 26, 123202 (2014),
- L8.** M. Farle, *Rep. Prog. Phys.* 61 755 (1998),
- L9.** S.O. Demokritov, B. Hillebrands, A.N. Slavin, *Physics Reports*, 348, 441 (2001),
- L10.** J.R. Sandercock, *Trends in Brillouin light scattering: studies of opaque materials, supported films and central modes*, edited by M. Cardona and G. Giintherodt, volume 5 1 of *Topics in Appl. Physics*, page 173, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 1982,

- L11.** S. O. Demokritov and V. E. Demidov, IEEE Trans. Mag. 44, 6 (2008),
- L12.** J. D. Adam, T. W. O’Keeffe, and R. W. Patterson, J. Appl. Phys. 50, 2446 (1979),
- L13.** A. G. Gurevich and G. A. Melkov, Magnetization Oscillations and Waves (CRC, New York, 1996),
- L14.** V. E. Demidov, M. P. Kostylev, K. Rott, P. Krzysteczko, G. Reiss, and S. O. Demokritov, Phys. Rev. B, 83, 054408 (2011),
- L15.** T. Schneider, A. A. Serga, A. V. Chumak, C. W. Sandweg, S. Trudel, S. Wolff, M. P. Kostylev, V. S. Tiberkevich, A. N. Slavin, and B. Hillebrands, Phys. Rev. Lett. 104, 197203 (2010),
- L16.** V. E. Demidov, S. O. Demokritov, D. Birt, B. O’Gorman, M. Tsoi, and X. Li, Phys. Rev. B 80, 014429 (2009),
- L17.** V. Veerakumar and R. E. Camley, Phys. Rev. B 74, 214401 (2006),
- L18.** P. Kabos and V. S. Stalmachov, Magnetostatic Waves and Their Applications (Chapman and Hill, London, UK, 1994),
- L19.** E. H. Lock, Phys. Usp. 51(4), 375 (2008),
- L20.** Landolt-Bornstein, Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology, Group 3, vol. 12 (Springer, Berlin, 1978),
- L21.** C. Vittoria, P. Lubitz, P. Hansen and W. Tolksdorf, J. Appl. Phys. 57 3699 (1985),
- L22.** B.A. Kalinikos, N. G. Kovshikov and A. N. Slavin, J. Appl. Phys. 69 5712 (1991),
- L23.** A. Stupakiewicz, A. Kirilyuk, A. Fleurence, **R. Gieniusz**, T. Maroutian, P. Beauvillain, A. Maziewski, Th. Rasing, Phys. Rev. B 80, 094423 (2009),
- L24.** S. Pal, B. Rana, O. Hellwig, T. Thomson, A. Barman, Appl. Phys. Lett. 98 (2011) 082501.

2.5 Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

W 1973 roku rozpocząłem studia magisterskie na Wydziale Matematyczno-Przyrodniczym Filii Uniwersytetu Warszawskiego w Białymstoku w zakresie fizyki, specjalność nauczycielska. Pracę magisterską wykonałem w Pracowni Fizyki Magnetyków Filii Uniwersytetu Warszawskiego w Białymstoku (obecnie Zakład Fizyki Magnetyków Uniwersytetu w Białymstoku) pod opieką prof. dr hab. Henryka Szymczaka z IF PAN w Warszawie. Obrona pracy, zatytułowanej "*Badanie struktur domenowych jako funkcji temperatury w ferrimagnetykach o jednoosiowej anizotropii*", odbyła się we wrześniu 1977 roku.

W październiku 1977 roku rozpocząłem pracę w Filii Uniwersytetu Warszawskiego w Białymstoku. Początkowo byłem zatrudniony, jako stażysta, w Zakładzie Fizyki. W kolejnych latach (1978-79) pracowałem na stanowisku samodzielnego fizyka, w latach (1980-87) na stanowisku starszego asystenta, w latach (1987-92) jako specjalista naukowo-techniczny, od roku 1992 do 2001 pracowałem na stanowisku adiunkta a od roku 2001 jako starszy wykładowca w Zakładzie Fizyki Magnetyków kierowanym przez prof. dr hab. A. Maziewskiego.

Byłem współautorem rozbudowy w Zakładzie Fizyki Magnetyków szeregu układów pomiarowych, między innymi polaryzacyjnych układów mikroskopowych do obserwacji obrazów geometrycznych i dyfrakcyjnych magnetycznych struktur domenowych w warstwach granatów z wykorzystaniem magnetoptycznego efektu Faradaya. Uczestniczyłem w rozwijaniu badań optyki zintegrowanej, w rozbudowie spektrometru rezonansu ferromagnetycznego oraz w opracowaniu nowych, oryginalnych metod badawczych, opartych na technikach wykorzystujących magnetoptyczne efekty Faradaya i Kerra.

2.5A Osiągnięcia w pracy naukowej przed uzyskaniem stopnia doktora

Od początku zatrudnienia brałem aktywny udział w pracach naukowo-badawczych prowadzonych w Pracowni, a następnie Zakładzie Fizyki Magnetyków. W początkowym okresie mego zatrudnienia obiektem analizy były głównie epitaksjalne warstwy granatów itrowo-żelazowych z różnymi domieszkami (Lu, Bi, Co), osadzone na podłożu granatu gadolinowo-galowego ($Gd_3Ga_5O_{12}$). Prowadziłem badania: (i) zmienności struktury domenowej w pobliżu przejść fazowych indukowanych polem magnetycznym przykładanym prostopadle do osi łatwej magnetyzacji lub temperaturą (Acta Physica Polonica A68, 7 (1985), FERRITES: Proceedings of International Conference ICF-3 Kyoto 590-493 (1980)), (ii) anizotropii magnetycznej w warstwach granatów, (iii) propagacji światła w płaszczyźnie próbki - warstwy granatów były wykorzystywane jako światłowody planarne (SPIE Proc. 670, 214 (1986)). Badania struktur domenowych oraz obrazów dyfrakcyjnych pozwoliły na zaobserwowanie szeregu interesujących efektów, które zaowocowały między innymi koncepcją przełącznika obrazu dyfrakcyjnego niewielkim polem magnetycznym (Optics Comm. 51, 3, 167 (1984)).

W roku 1984, we współpracy z dr Lechem Smoczyńskim, zacząłem rozwijać w Białymstoku tematykę badawczą dotyczącą magnetostatycznych drgań własnych w cienkich warstwach magnetyka o niewielkim współczynniku tłumienia Gilberta. Analizowałem wpływ anizotropii magnetycznej na właściwości tych fal w warstwach granatów YIG (J. Magn. Magn. Mater., 66, 366, (1987)). Badania te stały się głównym tematem mojej rozprawy doktorskiej. Problematykę tę realizowałem również we współpracy międzynarodowej z fizykami z Ukrainy i Rosji. W latach 1984-1989 odbyłem krótkie staże naukowe w State Electrotechnical University Sankt Petersburg oraz na Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv.

Przewód doktorski został otwarty w 1986 roku. Rezultaty prowadzonych badań zostały zaprezentowane w pracy doktorskiej pt. "**Magnetostatyczne drgania własne w warstwach granatów $Y_3Fe_5O_{12}$ z uwzględnieniem anizotropii kubicznej i jednoosiowej**" wykonanej pod kierunkiem prof. dr hab. Ritty Szymczak. Obrona pracy odbyła się w Instytucie Fizyki PAN w Warszawie w kwietniu 1990 roku.

2.5B Osiągnięcia w pracy naukowej po uzyskaniu stopnia doktora

Moja działalność naukowa po uzyskaniu stopnia doktora dotyczyła badań (i) cienkich i ultracienkich materiałów magnetycznych, takich jak, warstwy i wielowarstwy kobaltu, (ii) warstw granatów oraz (iii) hetero-struktury metal/granat. Początkowo były to pomiary anizotropii magnetycznej i stałych tłumienia w warstwach YIG i YIG:Bi metodą rezonansu ferromagnetycznego oraz przy wykorzystaniu mikrofalowego analizatora widma.

Kilkanaście lat temu włączyłem się w nowy nurt intensywnie podjętych w Zakładzie Fizyki Magnetyków badań w zakresie nanomagnetyzmu. Techniki rezonansu ferromagnetycznego okazały się bardzo przydatne do tego celu. Podjąłem badania wpływu parametrów struktury warstw otaczających (pokrywającej i buforowej) na właściwości magnetyczne pojedynczych ultracienkich warstw kobaltu. Metodą FMR badałem anizotropię magnetyczną tych materiałów (J. Magn. Magn. Mater., 316, 511 (2007)) w funkcji parametrów takich jak grubość, morfologia oraz skład chemiczny (Au, Ag, Mo, V, Cr, Pt) warstw otaczających. Główne wyniki dotyczyły: (i) modyfikacji anizotropii magnetycznej w warstwach kobaltu poprzez zmianę geometrii oraz rodzaju warstw otaczających w szerokim zakresie ich grubości; (ii) przestrzennego modelowania struktur domenowych indukowanych grubością warstwy magnetycznej, buforowej oraz przykrywającej, (iii) silnej zmian rozmiarów geometrycznych (o kilka rzędów wielkości w zakresie spinowej reorientacji) w tych układach. Część uzyskanych wyników stanowi materiał wykorzystany w jednotematycznym cyklu publikacji.

Zrozumienie mechanizmów magnesowania w skali mikrometrowej dla warstw pojedynczych pozwoliło wytworzyć, we współpracy z Instytutem Fizyki Molekularnej PAN w Poznaniu, kolejne interesujące konfiguracje nanostruktur o zmiennej wielokrotności warstwy magnetycznej $(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au})_N$, wykazujących efekt gigantycznego magnetooporu. Aktywnie również włączyłem się w badania właściwości magnetycznych tych materiałów w szerokim zakresie grubości warstwy magnetycznej oraz zmiennej wielokrotności przy wykorzystaniu techniki FMR (Journal of Applied Physics 110, 043924 (2011)).

Brałem także udział w badaniach magnetycznej anizotropii i procesów magnesowania w warstwach Pt/Co/Pt. Na uwagę zasługuje projekt wpływu naświetlania jonami Ga^+ na właściwości magnetyczne ultracienkich warstw Pt/Co/Pt. Projekt realizowany był we współpracy z Laboratory of Solid State Physics, Paris-Sud University, Orsay Cedex oraz Ion Beam Physics and Material Research, Forschungszentrum Dresden-Rossendorf, Dresden. Badania pokazały, że pod wpływem bombardowania jonami Ga^+ w warstwie kobaltu z namagnesowaniem w płaszczyźnie indukowana jest reorientacja magnetyzacji od kierunku prostopadłego do płaszczyzny warstwy (prezentacja plakatowa na konferencji JEMS-2010, Kraków, publikacja w przygotowaniu).

W roku 2007, dzięki finansowemu wsparciu programu NANOMAG-LAB odbyłem kilkumiesięczny staż w ośrodku badań kryształów magnonicznych w Department of Physics, The University of Kaiserslautern. Celem mojego pobytu było zapoznanie się z techniką rozpraszania światła Brillouina. W Kaiserslautern prowadziłem badania warstw kobaltu przy użyciu klasycznego układu BLS. Pomiary te pozwoliły wyznaczyć anizotropię magnetyczną oraz stałe sprężystości w tych materiałach. W ośrodku w Kaiserslautern miałem też możliwość zapoznania się z nowoczesnymi opcjami tej aparatury, unikatowej w skali światowej, mianowicie BLS z czasową i przestrzenną rozdzielczością oraz układem mikroskopu BLS. Układy te pozwalały na badanie strukturyzowanych materiałów oraz obiektów magnetycznych o submikronowych rozmiarach takich jak magnetyczne kropki Py.

Brałem również aktywny udział w pomiarach FMR i badaniach właściwości magnetycznych w ultracienkich warstwach kobaltu osadzonych na podłożach schodkowych (Phys. Stat. Sol. B, 243, 202 (2006), Phys. Rev. B 80, 094423 (2009)) oraz anizotropii magnetycznej i stałych tłumienia kobaltu w heterostrukturach Co/YIG i Co/YIG:Co.

W 2009 roku odbyłem krótki staż w Ion Beam Physics and Material Research, Forschungszentrum Dresden-Rossendorf mający na celu poznanie techniki pomiarowej szerokopasmowego rezonansu ferromagnetycznego (VNA-FMR).

Wiedza zdobyta między innymi w trakcie odbytych staży naukowych była pomocna w opracowaniu strategii rozwoju nowoczesnego zaplecza aparaturowego w ZFM w Białymstoku. W ramach Krajowego Centrum Nanostruktur Magnetycznych do Zastosowań w Elektronice Spinowej – SPINLAB zdecydowano o zakupie (ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego) nowoczesnego spektrometru BLS z rozdzielczością czasową i przestrzenną. Brałem aktywny udział w realizacji zakupu tego spektrometru BLS a później w jego uruchomieniu. W latach 2010-2011 w trakcie stażu w Institute of Applied Physics Westfaelische Wilhelms-Universitaet Muenster (Niemcy) zapoznałem się z nowymi możliwościami pomiarowymi układów BLS. Wspólne badania, między innymi wzbudzeń namagnesowania w nanokropkach z permaloju z wykorzystaniem układu mikroBLS, zaowocowały publikacją dotyczącą harmonicznych nieliniowych wzbudzeń namagnesowania w tych obiektach. Zapoznałem się również z badaniami spektroskopii BLS prowadzonymi na Uniwersytecie w Perugii (prezentacja plakatowa na konferencji PM'11, 2011 Poznań).

Uruchomienie spektrometru BLS pozwoliło na rozpoczęcie badań nowej klasy obiektów - kryształów magnonicznych oraz strukturyzowanych cienkich warstw magnetycznych. Badania te prowadzone są, z moim aktywnym udziałem, w ramach realizacji

finansowanego przez FNP projektu TEAM „Statics and dynamics of magnonic and magnetophotonic crystals” – SYMPHONY. Możliwości badań w Białymstoku znacznie zwiększyły się również dzięki zakupowi (ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego na realizację inwestycji aparaturowej) w 2013 roku układu szerokopasmowego rezonansu ferromagnetycznego VNA-FMR (brałem udział w procedurach zakupowych i uruchamianiu tego układu).

W ostatnim okresie, aktywnie uczestniczyłem w kompleksowym badaniu strukturyzowanych warstw granatów w postaci: pojedynczego otworka, linii otworków, układu 2D otworków oraz periodycznego układu 1D rowków w warstwie YIG oraz układu pasków złota na powierzchni YIG. Wyniki tych badań stanowią istotną część jednotematycznego cyklu prac stanowiących podstawę postępowania habilitacyjnego.

Posiadana w ZFM aparatura pomiarowa a także krajowa i międzynarodowa współpraca pozwoliły mi na uczestniczenie również w wielu innych projektach oraz badaniach takich materiałów jak: i) manganity - we współpracy z Institute of Metal Physics, Ural Division, Russian Academy of Sciences, 620990 Yekaterinburg, (Russia) (Eur. Phys. J. B 86, 213 (2013)), ii) jednorodne i strukturyzowane stopy magnetyczne FeAl - we współpracy z Forschungszentrum Dresden-Rossendorf (pierwsza praca dotycząca badań statycznych FeAl została przyjęta do druku w IEEE Transactions on Magnetism (2014)), iii) strukturyzowane warstwy permalojowe - we współpracy z Information Storage Materials Laboratory, Department of Electrical and Computer Engineering, National University of Singapore, (Singapore) oraz z Instytutem Fizyki Molekularnej PAN w Poznaniu; iv) strukturyzowane warstwy Co – we współpracy z Instytutem Fizyki PAN w Warszawie.

Białystok, 2014.08.12

