

Załącznik 2 *do Wniosku Marii Tekielak 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	3
2.4B. Omówienie celu naukowego prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania	4
2.5 Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych	10
2.5A. Osiągnięcia w pracy naukowej przed uzyskaniem stopnia doktora	11
2.5B. Osiągnięcia w pracy naukowej po uzyskaniu stopnia doktora	11



2.1 Imię i nazwisko: Maria Tekielak

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

magister Filia Uniwersytetu Warszawskiego w Białymstoku, Wydział Matematyczno-Fizyczny, 1983 r.
Praca magisterska pt. „*Magnetooptyczna analiza opóźnienia magnetycznego w warstwie granatu $Y_2Ca_1Fe_{3.9}Co_{0.1}Ge_1O_{12}$* ” wykonana w Pracowni Fizyki Magnetyków Filii Uniwersytetu Warszawskiego w Białymstoku (obecnie Zakład Fizyki Magnetyków Uniwersytetu w Białymstoku) pod opieką prof. dr hab. Andrzeja Maziewskiego

doktor nauk fizycznych
Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie, 1998 r.
Praca doktorska pt. „*Magnetyczna anizotropia i przejścia fazowe związane z reorientacją namagnesowania w warstwach granatów domieszkowanych kobaltom*” wykonana pod kierunkiem prof. dr. hab. Andrzeja Maziewskiego.

2.3 Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

1984-1985 stażysta, Ośrodek Komputerowy, Katedra Fizyki, Filia Uniwersytetu Warszawskiego w Białymstoku

1985-1989 starszy technik, Pracownia Fizyki Magnetyków (obecnie Zakład Fizyki Magnetyków), Katedra Fizyki, Filia Uniwersytetu Warszawskiego w Białymstoku

1990-1991 specjalista, Katedra Fizyki, Filia Uniwersytetu Warszawskiego w Białymstoku (od 1991 Instytut Fizyki Filii Uniwersytetu Warszawskiego w Białymstoku)

1992-1994 specjalista naukowo-techniczny, Instytut Fizyki, Filia Uniwersytetu Warszawskiego w Białymstoku

1995-1998 starszy specjalista naukowo-techniczny, Instytut Fizyki, Filia Uniwersytetu Warszawskiego w Białymstoku (od 1997 Instytut Fizyki Uniwersytetu w Białymstoku)

od 1998 adiunkt, Instytut Fizyki, Uniwersytet w Białymstoku (od 1999 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, składający się z 9 prac naukowych. Tematem cyklu są „*Procesy magnesowania i magnetyczne struktury domenowe w różnorodnych nanostrukturach – od warstw pojedynczych do wielokrotnych*”.

2.4A. Wykaz prac stanowiących jednotematyczny cykl publikacji

Teksty prac naukowych, stanowiących jednotematyczny cykl publikacji, znajdują się w Załączniku 5

- H1. M. Tekielak, Z. Kurant, A. Maziewski, L.T. Baczewski, A. Maneikis, A. Wawro,
Anisotropy of magnetic domain wall orientation in ultrathin Co grown on Mo(110) buffer layer,
Journal of Magnetism and Magnetic Materials 290, 783 (2005)
- H2. W. Stefanowicz, M. Tekielak, W. Bucha, A. Maziewski, V. Zablotskii, L.T. Baczewski, A. Wawro,
Dendritic domain structures in ultrathin cobalt films,
Materials Science – Poland 24, No. 3, 783 (2006)
- H3. W. Dobrogowski, Z. Kurant, A. Nedzved, W. Stefanowicz, M. Tekielak, L.T. Baczewski, A. Wawro, A. Maziewski,
Image processing study of ultrathin cobalt domain structure evolution induced by overlayer structure,
Materials Science – Poland 25, No. 2, 405 (2007)
- H4. Z. Kurant, R. Gieniusz, A. Maziewski, M. Tekielak, W. Stefanowicz, I. Sveklo, V. Zablotskii, A. Petroutchik, L.T. Baczewski, A. Wawro,
Changes in magnetic properties of ultrathin cobalt films as induced by Mo, V, Au overlayers,
Journal of Magnetism and Magnetic Materials 316, Issue 2, e511 (2007)
- H5. P. Mazalski, I. Sveklo, M. Tekielak, A. Kolendo, A. Maziewski, P. Kuświk, B. Szymański, F. Stobiecki,
Magnetic properties of (Co/Au)_N multilayers with different number of repetition N,
Materials Science – Poland 25, No. 4, 1289 (2007)
- H6. M. Tekielak, R. Schäfer, J. McCord, A. Maziewski, V. Zablotskii, L.T. Baczewski, A. Wawro,
Needle-like domain structure in Co films deposited on Mo (110),
Journal of Magnetism and Magnetic Materials 316, Issue 2, 184 (2007)
- H7. M. Tekielak, P. Mazalski, A. Maziewski, R. Schäfer, J. McCord, B. Szymański, M. Urbaniak, F. Stobiecki,
Creation of out-of-plane magnetization ordering by increasing the repetitions number N in (Co/Au)_N multilayers,
IEEE Transactions on Magnetism 44, No. 11, 2950 (2008)
- H8. M. Tekielak, M. Dąbrowski, M. Kisielewski, A. Maziewski, V. Zablotskii,
Magnetic states and magnetization reversal in magnetostatically coupled multilayers with low perpendicular anisotropy,
Journal of Applied Physics 107, 083911 (2010)
- H9. M. Tekielak, R. Gieniusz, M. Kisielewski, P. Mazalski, A. Maziewski, V. Zablotskii, F. Stobiecki, B. Szymański, R. Schäfer,
The effect of magnetostatic coupling on spin configurations in ultrathin multilayers,
Journal of Applied Physics 110, 043924 (2011)

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

Głównym tematem cyklu prac, stanowiących podstawę postępowania habilitacyjnego, są właściwości magnetyczne różnorodnych nanostruktur magnetycznych na przykładzie warstwy kobaltu o różnej wielokrotności - od warstwy pojedynczej do układu wielowarstw. W badaniach szczególną uwagę zwrócono na przestrzenne uporządkowanie magnetyczne, przejścia fazowe związane z reorientacją magnetyzacji, magnetyczną strukturę domenową oraz sprzężenie magnetostatyczne pomiędzy warstwami. Problemy te, o fundamentalnym znaczeniu dla fizyki cienkowarstwowych materiałów magnetycznych, nie były dotychczas dostatecznie głęboko badane.

Właściwości magnetycznych nanostruktur bardzo silnie zależą od struktury obszaru międzywarstwowego oraz od naprężeń w warstwie magnetycznej, wywołanych, między innymi, niedopasowaniem stałych sieciowych sąsiadujących warstw. W strukturach o ograniczonej wymiarowości znaczna część atomów, znajdujących się na ich powierzchni, sąsiaduje z atomami innego rodzaju. Zmiana symetrii otoczenia powoduje np. modyfikację struktury elektronowej, co w efekcie może prowadzić do zmian właściwości magnetycznych. W prezentowanym cyklu prac podane będą przykłady modyfikacji uporządkowania magnetycznego poprzez zmianę otoczenia ultracienkiej warstwy, to jest struktury pokrycia (na poziomie atomowym) oraz struktury warstwy buforowej, w tym jej orientacji.

Opisując właściwości magnetyczne ferromagnetyka wygodnie jest posługiwać się bezwymiarowym parametrem – zwanym parametrem jakości Q - definiowanym jako stosunek energii anizotropii jednoosiowej do energii odmagnesowania nieskończonej warstwy. Parametr Q silnie zależy, między innymi, od grubości magnetycznej nanostruktury. Zmieniając grubość warstwy ferromagnetycznej można zaobserwować wystąpienie dwóch reorientacji magnetyzacji (RPT). W ferromagnetyku o grubości rzędu pojedynczych warstw atomowych, bardzo duży wkład magnetycznej anizotropii powierzchniowej powoduje uporządkowanie magnetyzacji prostopadle do powierzchni. W miarę wzrostu grubości, przy pewnej wartości krytycznej d_{RPT1} (w przypadku warstw kobaltu równej około $d = 2$ nm) zachodzi reorientacja do namagnesowania w płaszczyźnie (RPT-1). Zwykle zakłada się, że $Q(d_{RPT1}) = 1$. Dalszemu wzrostowi grubości towarzyszy powstawanie, w objętości warstwy, domen magnetycznych z dużą poza-płaszczyznową składową magnetyzacji, co oznacza reorientację magnetyzacji (RPT-2) do kierunku prostopadłego względem płaszczyzny warstwy. W przypadku kobaltu RPT-2 zachodzi przy grubości około $d = 30$ nm.

Przedmiotem badań prezentowanego cyklu prac są różnorodne układy cienkowarstwowe typu X/Co/Y, gdzie X i Y oznaczają nieferromagnetyczne warstwy molibdenu (Mo), złota (Au) lub wanadu (V) oraz wielowarstwy $[Au/Co]_N$ (N jest liczbą wielokrotności). Różne konfiguracje nanostruktur z pojedynczą warstwą magnetyczną zostały wytworzone metodą epitaksji z wiązek molekularnych (ang. molecular beam epitaxy - MBE) w ultra wysokiej próżni w Instytucie Fizyki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie. Były to serie próbek płaskich oraz w kształcie klina. Warstwy wielokrotne typu $[Au/Co]_N$ wytwarzano za pomocą magnetronowego rozpylania jonowego w atmosferze argonu w Instytucie Fizyki Molekularnej Polskiej Akademii Nauk w Poznaniu. Proces wzrostu 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).

Magnetyczne i magneto-optyczne badania *ex-situ* zostały wykonane w większości w Zakładzie Fizyki Magnetyków Uniwersytetu w Białymstoku. Przeprowadzono je stosując różne, komplementarne techniki eksperymentalne, takie jak: (i) wysokorozdzielcza

polaryzacyjna mikroskopia magnetoptyczna Kerra w konfiguracjach polarnej i podłużnej, z możliwością wektorowej analizy zmienności magnetyzacji pod wpływem różnej orientacji pola magnetycznego; (ii) magnetometria magnetoptyczna Kerra w trzech podstawowych konfiguracjach (polarnej, podłużnej i poprzecznej); (iii) mikroskopia sił magnetycznych MFM; (iv) spektroskopia rezonansu ferromagnetycznego FMR oraz (v) magnetometria wibracyjna VSM.

Do przestrzennej analizy stanu magnetycznego w całym obszarze próbki opracowano metodę obrazowania remanencyjnego (obrazowania pozostałości magnetycznej), polegającą na rejestracji (przy pomocy polaryzacyjnej mikroskopii magnetoptycznej Kerra) kolejno dwóch obrazów powierzchni próbki przemagnesowanej prostopadłym zewnętrznym polem magnetycznym, a następnie ich różnicowaniu. W efekcie, po zastosowaniu pól o wartościach wystarczających do jednorodnego namagnesowania próbki, uzyskiwano obraz remanencyjny. Metoda ta jest szczególnie istotna w przypadku złożonej przestrzennej konfiguracji warstw o zmiennej grubości (np. w kształcie klina), dla których klasyczne (objętościowe) techniki magnetometryczne nie są skuteczne. Należy także podkreślić wyjątkowe możliwości zastosowania tej metody np. w trakcie magnetoptycznej charakteryzacji warstw *in-situ* podczas ich wytwarzania.

Równolegle do badań eksperymentalnych przeprowadzono modelowanie lokalnych rozkładów magnetyzacji w oparciu o program do symulacji mikromagnetycznych OOMMF (ang. Object Oriented MicroMagnetic Framework).

W prezentowanym opisie cyklu prac wydzielono dwie zasadnicze części: wyniki uzyskane dla struktur zawierających pojedynczą warstwę kobaltu [H1-H4, H6] oraz wyniki uzyskane dla układów warstw wielokrotnych [H5, H7-H9]. W przypadku badania warstw pojedynczych głównym celem było wyjaśnienie mechanizmów wpływu parametrów nieferromagnetycznej warstwy buforowej lub pokrywającej takich, jak grubość, morfologia czy skład chemiczny, na magnetyczne właściwości ultracienkiej warstwy kobaltu. Zmiana grubości warstwy magnetycznej lub struktury i grubości otaczających ją warstw może wywoływać silne zmiany anizotropii magnetycznej, co z kolei może skutkować występowaniem reorientacji magnetyzacji oraz drastycznymi zmianami rozmiarów struktury domenowej lub pojawieniem się preferencji kierunku ścian domenowych. Prezentowany cykl prac zawiera przykłady modyfikacji uporządkowania magnetycznego poprzez zmianę otoczenia ultracienkiej warstwy ferromagnetycznej, to jest struktury jej pokrycia (na poziomie atomowym) oraz struktury warstwy buforowej, w tym jej orientacji krystalograficznej. Wyniki te stanowią punkt wyjścia do analizy procesów magnesowania w układach warstw wielokrotnych, w których bardzo istotne jest zrozumienie charakteru międzywarstwowego oddziaływania magnetycznego oraz jego wpływu na przestrzenne i lokalne uporządkowanie magnetyczne.

W pracy [H1] przedstawiono wyniki badań magnetycznych struktur domenowych oraz procesów magnesowania w warstwach typu Mo/Co/Au. Metoda obrazowania remanencyjnego, w funkcji amplitudy zewnętrznego pola magnetycznego prostopadłego do powierzchni warstwy pokazała, że w zakresie grubości kobaltu $d = 0.5-1.0$ nm występuje prostopadła składowa magnetyzacji, natomiast powyżej tej grubości zachodzi reorientacja wektora magnetyzacji do płaszczyzny warstwy. Badania lokalizacji ścian domenowych podczas procesu przemagnesowania, przeprowadzone w obszarze występowania prostopadłej składowej magnetyzacji, pozwoliły określić zależność pola koercji od grubości warstwy kobaltu. Zaobserwowano dwa mechanizmy procesów magnesowania w obecności zewnętrznego pola magnetycznego skierowanego prostopadle do powierzchni warstwy w funkcji grubości warstwy kobaltu: nukleację - zarodkowanie nowych domen (dla dwóch zakresów grubości kobaltu o niskiej wartości pola koercji: $d \approx 0.5$ nm i $d \approx 1$ nm) oraz propagację ścian domenowych w obszarze grubości kobaltu o wysokiej koercji, około $d = 0.7$ nm.

Stwierdzono również istnienie silnej jednoosiowej anizotropii w płaszczyźnie warstwy, wpływającej zarówno na proces magnesowania warstw, jak również na preferencję orientacji ścian domen magnetycznych. Analiza wyników RHEED wykazała, że warstwa buforowa Mo(110), osadzona na podłożu szafirowym o orientacji (11-20), wykazuje silną dystorsję wzdłuż kierunku [001]. W związku z tym w warstwach Co(0001) i Mo(110) występuje zmiana efektywnej stałej anizotropii, ze znaczącym wkładem anizotropii magnetoelastycznej. Kierunek preferencji orientacji magnetycznych ścian domenowych pokrywa się z kierunkiem Mo[001].

Badania procesów magnesowania kontynuowano w warstwach o podobnej konfiguracji (Mo/Co/Au) w większym zakresie grubości klina kobaltu ($d = 5\text{--}50\text{ nm}$), gdzie magnetyzacja jest zorientowana w płaszczyźnie warstwy [H6]. Zależności pola koercji od grubości warstwy kobaltu oraz od kierunku przyłożenia pola magnetycznego w płaszczyźnie, wyznaczone dla różnych grubości kobaltu, wykazują maksimum, które odpowiada orientacji osi trudnego magnesowania, równoległej do kierunku krystalograficznego Mo[1-10]. Natomiast kierunek osi łatwego magnesowania koresponduje z kierunkiem krystalograficznym Mo[001]. Obserwowano magnetyczną strukturę domenową w kształcie igieł (ang. needle-like) z namagnesowaniem w płaszczyźnie próbki. Orientacja oraz rozmiar igieł były zależne od grubości warstwy kobaltu oraz od kierunku przyłożenia zewnętrznego pola magnetycznego w płaszczyźnie warstwy. Dla mniejszej grubości warstwy kobaltu ($d = 15\text{ nm}$), warstwa molibdenu silnie wpływała na orientację ścian domenowych. W przypadku większych grubości Co, orientacja ścian domenowych zależała zarówno od orientacji osi łatwego magnesowania, jak i od kierunku zewnętrznego pola magnetycznego zastosowanego do wytworzenia domen. Powyżej pewnej grubości krytycznej, d_{RPT2} , orientacja ścian domenowych zależała jedynie od kierunku zewnętrznego pola magnetycznego.

Do analizy kształtu oraz orientacji magnetycznych struktur domenowych opracowano technikę cyfrowego przetwarzania obrazów. Pozyskiwanie, przetwarzanie i analiza obrazów struktur domenowych odbywały się przy pomocy oryginalnego oprogramowania rozwiniętego na bazie LabView. Zaproponowano algorytm cyfrowego przetwarzania obrazów igłowych domen magnetycznych w ultracienkich warstwach kobaltu. Algorytm ten polega na transformacji igłowych obiektów w binarną sieć, a następnie obliczaniu ich parametrów geometrycznych. Procedura ta okazała się niezwykle przydatna do określania preferencji orientacji ścian domenowych, wywołanej różnymi czynnikami, np. magnetyczną anizotropią krystaliczną, naprężeniami, schodkowym podłożem lub zewnętrznym polem magnetycznym.

Wpływ nieferromagnetycznej warstwy przykrywającej na zmiany anizotropii magnetycznej oraz magnetycznych struktur domenowych w ultracienkiej warstwie kobaltu, w kształcie klina o grubości $d = 0\text{--}2\text{ nm}$, badano z wykorzystaniem warstw typu X/Co/Y (gdzie X, Y = Mo, V, Au) [H4]. Badania prowadzono w funkcji grubości zarówno warstwy ferromagnetycznej, jak również warstwy przykrywającej. Analiza, wykonana z wykorzystaniem metody obrazowania remanencyjnego, wykazała, że grubość kobaltu, przy której występuje reorientacja namagnesowania od osi łatwego magnesowania (prostopadłej względem powierzchni próbki) do łatwej płaszczyzny, zależy od rodzaju nieferromagnetycznej warstwy przykrywającej kobalt. Zaobserwowano nierównowagę wpływu międzypowierzchni Mo/Co i Co/Mo na uprządkowanie magnetyczne. Gdy warstwą przykrywającą jest molibden, wówczas magnetyczna anizotropia kobaltu w płaszczyźnie jest słabsza, co jest związane z pseudomorficznym wzrostem Mo na kobalcie. W rezultacie powstają słabe odkształcenia w warstwie Co (w porównaniu do kobaltu wyhodowanego na buforze Mo) i/lub w konsekwencji różne struktury elektronowe międzywarstwowych obszarów granicznych. W przypadku pokrycia warstwą wanadu, niewielka grubość tego materiału (0.1 nm) jest wystarczająca do tego, aby wywołać pełną reorientację magnetyzacji. Tak silny wpływ pokrycia wanadem można wyjaśnić zmianą uporządkowania

magnetycznego międzypowierzchni Co/V. Moment magnetyczny indukowany na powierzchni wanadu jest sprzężony antyferromagnetycznie w stosunku do kobaltu, więc zarówno spin, jak i momenty orbitalne kobaltu są zredukowane.

Obserwowano różnice w magnetycznych strukturach domenowych indukowanych warstwami przykrywającymi V i Mo. W pobliżu przejścia reorientacyjnego dominował nukleacyjny mechanizm przemagnesowania, podczas gdy dla cieńszych warstw Co – propagacja ścian domenowych. Rozmiar domen bardzo silnie zależał od grubości warstwy kobaltu i malał o kilka rzędów wielkości (do skali submikronowej), gdy grubość Co rosła do wartości, dla której obserwowana była reorientacja magnetyzacji. Analiza obrazów remanencyjnych wykazała istnienie preferencji kierunku wzrostu magnetycznej struktury domenowej w warstwach typu Au/Co/Mo i jej brak w przypadku struktur domenowych występujących w układzie Au/Co/V.

Analiza ewolucji struktury domenowej w funkcji grubości ferromagnetyka pokazała, że w miarę zbliżania się do reorientacyjnego przejścia fazowego następuje zmniejszanie okresu struktury domenowej. W pracy [H2] przedstawiono badania ultracienkich struktur Au/Co/Au o grubości warstwy kobaltu ($d = 1.5$ nm) nieco poniżej grubości, w której następuje reorientacja namagnesowania od stanu prostopadłego względem powierzchni warstwy do stanu płaszczyznowego. Warstwy charakteryzowały się prostokątną pętlą histerezy z silną anizotropią prostopadłą oraz występowaniem zjawiska opóźnienia magnetycznego. Proces przemagnesowania przebiegał początkowo poprzez nukleację domen, a następnie propagację ścian domenowych o charakterze dendrytowym (ang. dendritic). Wyznaczono parametry tego procesu takie, jak promień zakończenia domeny oraz powierzchniowa gęstość energii ściany domenowej.

Podobne struktury magnetyczne analizowano w pracy [H3] w ultracienkich warstwach kobaltu o strukturze Au/Co/X (gdzie X oznacza warstwę wanadu lub molibdenu), osadzonych na podłożu szafirowym. Na różnych etapach procesu przemagnesowania rejestrowano obrazy magnetycznych struktur domenowych, a następnie określono właściwości ich topologii. Zaprezentowano procedurę wyznaczania parametrów charakteryzujących struktury dendrytowe. Rozmiar domen oraz średnia szerokość dendrytów malały w miarę zbliżania się do grubości odpowiadającej reorientacji namagnesowania. Obserwowano preferencję orientacji ścian domenowych w ultracienkim Co pokrytym warstwą molibdenu oraz jej brak przy pokryciu wanadem. Związane jest to, między innymi, z istnieniem silnej anizotropii jednoosiowej w płaszczyźnie warstwy, indukowanej obecnością warstwy molibdenu.

Zagadnienie oddziaływania magnetostatycznego oraz jego wpływu na uporządkowanie magnetyczne i procesy magnesowania w wielowarstwach magnetycznych były przedmiotem analiz prowadzonych w pracach [H5, H7-H9]. W ogólnym przypadku przestrzeny rozkład magnetyzacji i procesy magnesowania zależą od wielu parametrów, takich jak: anizotropia pojedynczej warstwy, ilość powtórzeń N , grubość warstwy ferromagnetycznej i nieferromagnetycznej przekładki oraz sprzężenie wymienne pomiędzy warstwami. Prezentowane wyniki badań uzyskano dla wielowarstw o składzie $(\text{Co}(d)/\text{Au})_N$, czyli N -krotnie powtórzonej sekwencji ultracienkiej warstwy kobaltu i przekładki złota. Generalnie, przy kilkuatomowej grubości warstwy rozdzielającej, warstwy ferromagnetyczne oddziałują między sobą wymiennie i magnetostatycznie. Przy odpowiednio dobranej grubości nieferromagnetycznej przekładki, dominującą rolę w sprzężeniu międzywarstwowym odgrywa jedynie oddziaływanie magnetostatyczne. Prezentowane wyniki dotyczą tego przypadku.

Wstępne wyniki badań wielowarstw $[\text{Co}/\text{Au}]_N$ i $[\text{Py}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$ ($\text{Py}=\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$) z różną liczbą powtórzeń N od 1 do 15, o różnych grubościach warstwy kobaltu ($d = 0.6\text{--}1.5$ nm) oraz warstwy złota ($d_{\text{Au}} = 1.5\text{ nm}$, 3 nm), zaprezentowano w pracy [H5]. Wszystkie badane wielowarstwy charakteryzowały się kierunkiem łatwego magnesowania zorientowanym

prostopadle do powierzchni. Zaobserwowano silny wpływ liczby powtórzeń oraz grubości warstwy kobaltu, zarówno na strukturę domenową, jak i na procesy magnesowania. Ze wzrostem N obserwowano: ewolucję geometrii oraz zmniejszanie okresu struktury domenowej (do rozmiarów submikrometrowych), wzrost pola nasycenia, wzrost pola nukleacji od wartości ujemnej (dla małego N z prostokątną pętlą histerezy) do wartości dodatnich dla dużych N . Zwiększając ilość powtórzeń powyżej $N = 12$ zaobserwowano wzrost składowej prostopadłej magnetyzacji. Obserwowano również wzrost okresu struktury domenowej w funkcji grubości warstwy złota.

Wprowadzenie warstwy Py powodowało ekranowanie pola magnetycznego sąsiednich warstw kobaltu oraz dało możliwość zwiększenia grubości warstw oddzielających. Magnetostatyczne sprzężenie między warstwami kobaltu stawało się słabsze, tak więc przemagnesowanie poszczególnych warstw następowało niezależnie warstwa po warstwie. Efekt ten był obrazowany obecnością domen o wielu odcieniach szarości oraz występowaniem skoków w pętli histerezy.

Analizę, w szerszym zakresie grubości warstwy kobaltu, przeprowadzono w pracy [H7], gdzie badano kobalt o grubości mniejszej od d_{RPTI} ($d = 1$ nm) oraz kobalt o grubości większej od d_{RPTI} ($d = 2$ nm, $d = 3$ nm). W pierwszym przypadku wzrost liczby powtórzeń N powodował drastyczne zmniejszenie rozmiarów struktury domenowej oraz zmianę charakteru krzywych magnesowania – następowało przejście od materiału twardego do miękkiego magnetycznie. Natomiast w przypadku grubszych warstw kobaltu ($d = 2$ nm, $d = 3$ nm), gdzie w pojedynczej warstwie magnetyzacja jest zorientowana w płaszczyźnie, wzrost N indukował strukturę domenową z prostopadłą magnetyzacją.

Celem badań zaprezentowanych w pracy [H8] było pokazanie rozkładu magnetyzacji w poszczególnych warstwach magnetostatycznie sprzężonego układu o strukturze $(F/NF)_N$ (gdzie F oznacza warstwę ferromagnetyczną, NF warstwę nieferromagnetyczną). Badania przeprowadzono z wykorzystaniem mikromagnetycznych symulacji oraz na drodze rozważań teoretycznych. Analizowano ewolucję rozkładu magnetyzacji w dużym zakresie zmian parametrów Q i N - od najprostszego przypadku pojedynczej warstwy, poprzez warstwę podwójną do układu wielowarstw. Głównym wynikiem było stwierdzenie, że zakres istnienia magnetyzacji prostopadłej do powierzchni warstwy może być rozszerzony do $Q < 1$ przez właściwy wybór N i grubość warstwy ferromagnetycznej. Pokazano rolę magnetostatycznego sprzężenia międzywarstwowego w tworzeniu worteksowych i sinusoidalnie-podobnych, modulowanych okresowo rozkładów namagnesowania. Różne stany namagnesowania zostały zilustrowane na diagramie fazowym (Q, N) . Pokazano, że magnetycznie sprzężone słabo-anizotropowe wielowarstwy $(F/NF)_N$ stanowią magnetycznie miękki układ o niskich polach nasycenia, w którym rozmiary domen mogą być zmienione o kilka rzędów wielkości w wyniku małych zmian Q , N i/lub grubości nieferromagnetycznej przekładki. W przypadku układu dwu-warstwowego krytyczna wartość współczynnika jakości Q , przy którym zachodziła reorientacja magnetyzacji, została określona (z dobrą zgodnością) symulacyjnie oraz analitycznie. W odróżnieniu od warstwy pojedynczej, reorientacja magnetyzacji następowała przy znacznie mniejszej wartości parametru Q . Dowiedziono również, że w przypadku $N = 2$, sprzężenie magnetostatyczne zanika przy rozmiarach przekładki rzędu rozmiarów struktury domenowej.

Przedmiotem eksperymentalnych analiz, wzbogaconych mikromagnetycznymi symulacjami, zaprezentowanych w pracy [H9], były ultracienkie wielowarstwowe $(Co/Au)_N$ z anizotropią magnetyczną prostopadłą oraz w płaszczyźnie warstwy. Dokonano analizy oddziaływań magnetostatycznych dla zadanej, stałej geometrii układu ($d = 3$ nm i $d_{Au} = 3$ nm) w szerokim zakresie Q i N oraz w dwóch konfiguracjach przykładanego pola magnetycznego w płaszczyźnie i prostopadle do powierzchni próbki. W wyniku mikromagnetycznych symulacji, uzupełnionych pomiarami parametrów magnetycznych oraz wizualizacją struktury

domenowej, dokonano rekonstrukcji trójwymiarowego rozkładu namagnesowania wielowarstw. Pokazano, że w zakresie reorientacji magnetyzacji (charakteryzowanej przez $0 < Q < 1$) występują worteksove rozkłady namagnesowania składające się z par worteks-półantyworteks, z rdzeniem worteksu o eliptycznym przekroju namagnesowanym w płaszczyźnie warstwy. Rozmiar rdzenia worteksu, wzdłuż kierunku prostopadłego do płaszczyzny wielowarstwy, może być regulowany przez zmianę N lub zmianę grubości nieferromagnetycznej przekładki. Wyniki symulacji mikromagnetycznych zostały potwierdzone obserwacjami doświadczalnymi. Eksperymentalnie zaobserwowano duże (mikrometrowych rozmiarów) metastabilne domeny z namagnesowaniem w płaszczyźnie, związane z rdzeniem worteksów, modulowane przez domeny (submikronowych rozmiarów) z prostopadłą magnetyzacją i rozmiarami zdefiniowanymi głównie poprzez magnetostatykę.

Wykazano, że wzrost N prowadzi do zmian kształtu pętli histerezy, znacznego wzrostu pola nasycenia, a także zmian geometrii i rozmiarów struktury domenowej. W wielowarstwach z $Q < 1$, wzrost N powoduje zarodkowanie domen z namagnesowaniem pozapłaszczyznowym, które wywołują magnetostatyczne sprzężenie międzywarstwowe oraz przejście fazowe do stanów z magnetyzacją prostopadłą.

Badania procesu przemagnesowania w układach wielowarstwowych z $Q < 1$ i $Q > 1$ pokazały, że dla małych N może istnieć domenowy rozkład namagnesowania określony przez rozkład pól koercji. Jednak, gdy N rośnie, międzywarstwowe oddziaływanie magnetostatyczne staje się silniejsze, co prowadzi do uporządkowania domenowego, określonego przez magnetostatykę.

Podsumowanie

W cyklu publikacji przedstawiono wyniki badań (eksperymentalnych, symulacyjnych oraz teoretycznych) właściwości magnetycznych w nanostrukturach, na przykładzie warstwy kobaltu, ze zmianą wielokrotności od pojedynczej warstwy do układu wielowarstw. Uzyskano szereg interesujących wyników, dotyczących uporządkowania magnetycznego, struktury domenowej oraz procesów magnesowania. Znaczna ich część dotyczy fundamentalnych zjawisk w magnetyzmie układów niskowymiarowych i ma istotne znaczenie poznawcze. Do najważniejszych zaliczam:

I - w układach warstw pojedynczych

- wykazanie możliwości zmian parametru Q i regulacji zakresu występowania fazy z prostopadłą magnetyzacją poprzez odpowiedni dobór struktury nieferromagnetycznej warstwy buforowej lub pokrywającej
- zaobserwowanie różnego rodzaju struktur domenowych, zależnych od rodzaju warstwy buforowej oraz grubości warstwy ferromagnetycznej:
 - struktur typu igłowego w warstwach kobaltu osadzonych na buforze molibdenu, wyjaśnienie geometrii tych struktur poprzez występowanie w układach Mo/Co silnej magnetycznej anizotropii z osią łatwą magnetyzacji zorientowaną w płaszczyźnie,
 - dendrytowych struktur domenowych w warstwach kobaltu o wartościach Q bliskich jedności;
- obserwację znacznego zmniejszenia rozmiarów struktury domenowej (o kilka rzędów wielkości) w miarę zmniejszania się parametru Q do wartości równej 1 - zbliżania się do reorientacyjnego przejścia fazowego magnetyzacji od kierunku prostopadłego do powierzchni warstwy
- opracowanie metody obrazowania remanencyjnego w układzie polaryzacyjnego mikroskopu magnetoptycznego w nanostrukturach z prostopadłą anizotropią magnetyczną

II - w układach warstw wielokrotnych z $Q > 1$

- pokazanie, że wzrost liczby powtórzeń N powoduje zmianę charakteru krzywych magnesowania: silne zmniejszanie się pola koercji i magnetycznej remanencji - przejście od materiału magnetycznie twardego (z prostokątną pętlą histerezy) do miękkiego;
- zaobserwowanie silnego zmniejszenia rozmiarów struktury domenowej (do wielkości submikronowych) pod wpływem zwiększenia liczby warstw ferromagnetycznych

III - w układach warstw wielokrotnych z $Q < 1$

- obserwację zmiany uporządkowania magnetycznego wywołanej poprzez zwiększenie liczby wielowarstw N , od namagnesowania w płaszczyźnie do struktur domenowych z prostopadłą składową magnetyzacji;
- obserwacja współistnienia dwóch rodzajów domen magnetycznych: dużych metastabilnych domen magnetycznych, o rozmiarach rzędu mikrometra z płaszczyznową składową namagnesowania oraz drobnych domen (modulujących wspomniane powyżej duże domeny) o rozmiarach submikronowych, z magnetyzacją prostopadłą;
- uzyskanie, w wyniku symulacji mikromagnetycznych, przestrzennych rozkładów magnetyzacji w poszczególnych warstwach ferromagnetycznych dla różnych wartości, Q i N ; zmieniając te parametry można uzyskać zmianę uporządkowania wielowarstw od jednorodnego namagnesowania w płaszczyźnie do struktur typu worteksowego z rdzeniem zorientowanym w płaszczyźnie; wyniki symulacji zostały potwierdzone doświadczalnie.

Znajomość właściwości sztucznie wytworzonych ultracienkich struktur jest także ważna z punktu widzenia zastosowań w dziedzinie najnowszych osiągnięć nanotechnologii, takich jak nowej generacji układy do zapisu i odczytu informacji cyfrowej, głowice magnetooporowe w dyskach komputerowych o dużej gęstości zapisu informacji oraz inne urządzenia i układy spintroniki. Przeprowadzone badania statycznych procesów magnesowania, przedstawione w jednotematycznym cyklu prac, są szczególnie istotne dla wyjaśnienia fundamentalnych mechanizmów zachodzących w ultraszybkiej dynamice magnesowania. Można mieć nadzieję, że w przyszłości nowa generacja bardziej złożonych geometrycznie strukturyzowanych wielowarstwowych układów zero- oraz jednowymiarowych (np. układy pasków lub kropek/pilarów) pozwoli na obserwację nowych zjawisk zachodzących na poziomie kwantowym z przestrzenną manipulacją spinową.

2.5 Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

W 1977 roku rozpoczęłam studia magisterskie na Wydziale Matematyczno-Przyrodniczym Filii Uniwersytetu Warszawskiego w Białymstoku w zakresie fizyki, specjalność nauczycielska. Pracę magisterską wykonałam w Pracowni Fizyki Magnetyków Filii Uniwersytetu Warszawskiego w Białymstoku (obecnie Zakład Fizyki Magnetyków Uniwersytetu w Białymstoku) pod opieką prof. dr. hab. Andrzeja Maziewskiego. Obrona pracy, zatytułowanej "*Magnetooptyczna analiza opóźnienia magnetycznego w warstwie granatu $Y_2Ca_1Fe_{3.9}Co_{0.1}Ge_1O_{12}$* ", odbyła się w grudniu 1983 roku.

W styczniu 1984 roku rozpoczęłam pracę w Katedrze Fizyki Filii Uniwersytetu Warszawskiego w Białymstoku. Początkowo byłam zatrudniona, jako stażysta, w Ośrodku Komputerowym. W kolejnych latach (1985 - wrzesień 1998) pracowałam na stanowiskach technicznych i naukowo-technicznych w Pracowni Fizyki Magnetyków (obecnie Zakład Fizyki Magnetyków) kierowanym przez prof. dr. hab. Andrzeja Maziewskiego, a od października 1998 roku jestem zatrudniona na stanowisku adiunkta.

Początkowo zajmowałam się technologią i obróbką materiałów magnetycznych, jak również rozwijaniem wyposażenia optycznego w Pracowni Magnetyków. Odbyłam kilka kursów i szkoleń w tym zakresie, między innymi miesięczne Studium Mikroskopii Kontrastu Fazowego i Interferencyjnego, zorganizowane przez Centralne Laboratorium Optyki w Warszawie.

Byłam współautorką tworzenia, a następnie rozbudowy szeregu układów pomiarowych, między innymi polaryzacyjnych układów mikroskopowych do obserwacji obrazów geometrycznych i dyfrakcyjnych magnetycznych struktur domenowych w warstwach granatów z wykorzystaniem magnetooptycznego efektu Faradaya. Uczestniczyłam w tworzeniu oryginalnego oprogramowania (w językach Fortran, Pascal) do analizy pozyskiwanych obrazów.

W późniejszym okresie brałam aktywny udział w budowie systemu cyfrowej analizy obrazów w oparciu o kamery CCD oraz wdrażaniu tego systemu do badań obiektów magnetycznych. Uczestniczyłam w opracowaniu nowych, oryginalnych metod badawczych, opartych na technikach wykorzystujących magnetooptyczne efekty Faradaya i Kerra.

2.5A. Osiągnięcia w pracy naukowej przed uzyskaniem stopnia doktora

Od początku zatrudnienia brałam aktywny udział w pracach naukowo-badawczych prowadzonych w Pracowni, a następnie Zakładzie Fizyki Magnetyków. Obiektem badań były głównie epitaksjalne warstwy granatów itrowo-żelazowych z różnymi domieszkami (Lu, Bi, Co), osadzone na podłożu granatu gadolinowo-galowego ($\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$). Przeprowadzone badania pozwoliły zaobserwować szereg interesujących efektów, takich jak efekt fotomagnetyczny, efekt pamięci kształtu struktury domenowej, efekt samopodmagnesowania, czy dezakomodacja podatności magnetycznej. Fakty eksperymentalne wskazywały, że obserwowane zjawiska są zdeterminowane temperaturowymi zmianami energii anizotropii indukowanej w procesie wzrostu. Stąd wynikło moje zainteresowanie dogłębnymi i systematycznymi badaniami, w szerokim zakresie temperatur, anizotropii magnetycznej warstw granatów zawierających silnie anizotropowe jony kobaltu. Temat ten stał się głównym celem mojej rozprawy doktorskiej. Badania prowadziłam we współpracy międzynarodowej z fizykami z Ukrainy, Rosji, Niemiec i Francji. W latach 1994-1996 odbyłam staże naukowe w Instytucie Fizyko-Technicznym w Jenie oraz na Uniwersytecie w Lipsku w celu wykonania pomiarów anizotropii metodą anizotropii torsyjnej oraz metodą SQUID.

Przewód doktorski został otwarty w grudniu 1994 roku. Na prowadzenie prac badawczych, związanych z doktoratem, uzyskałam grant promotorski KBN. Wyniki badań zostały zaprezentowane w pracy doktorskiej pt. *"Magnetyczna anizotropia i przejścia fazowe związane z reorientacją namagnesowania w warstwach granatów domieszkowanych kobaltem"* wykonanej pod kierunkiem prof. dr. hab. Andrzeja Maziewskiego. Obrona pracy odbyła się w Instytucie Fizyki PAN w Warszawie w kwietniu 1998 roku.

2.5B. Osiągnięcia w pracy naukowej po uzyskaniu stopnia doktora

Moja działalność naukowa po uzyskaniu stopnia doktora dotyczyła badań magnetycznych nanostruktur, głównie z wykorzystaniem ultracienkich warstw kobaltu. Nanomagnetyzm jest jednym z intensywnie rozwijanych kierunków badań w Zakładzie Fizyki Magnetyków. Początkowo moja działalność była skupiona wokół wizualizacji magnetycznych struktur domenowych w układach Au/Co/Au, wytworzonych w Instytucie Fizyki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie. W tych układach, z moim aktywnym udziałem, zaobserwowano prostopadłą anizotropię magnetyczną oraz występowanie reorientacji magnetyzacji od kierunku prostopadłego do płaszczyzny warstwy ze zwiększaniem grubości kobaltu w zakresie pojedynczych warstw atomowych [*Physical Review Letters* 89, 8, 87203

(2002)]. Szczególnie interesujące okazały się nowe układy warstw w kształcie podwójnego klina, zarówno warstwy ferromagnetycznej, jak i warstwy sąsiadującej. Stosowane od lat w Zakładzie Fizyki Magnetyków techniki magnetooptyczne okazały się wyjątkowo przydatne w badaniach lokalnych z dużą rozdzielczością przestrzenną. Uzupełnieniem klasycznych pomiarów krzywych magnesowania techniką magnetooptyczną Kerra była metoda obrazowania remanencyjnego, która została zaproponowana i rozwijana przeze mnie w układzie polaryzacyjnej mikroskopii optycznej. Zaletą tej metody była szybka rejestracja (z akumulacją około 1 sekundy) obrazu całej próbki (najczęściej o rozmiarach $(10 \times 10) \text{ mm}^2$) techniką mikroskopii magnetooptycznej Kerra w konfiguracji polarnej. Kontrast obrazu, powstającego w wyniku analizy różnicowej, odpowiadał skręceniu Kerra, a więc składowej prostopadłej magnetyzacji. W przypadku próbki złożonej z wielu obszarów, o różnym składzie warstw i/lub różnej grubości, metoda ta pozwoliła zaobserwować mapy magnetyczne, obszary o różnej koercji w funkcji zewnętrznego pola magnetycznego, submilimetrowe struktury domenowe oraz gradientowe ściany domenowe.

Badania prowadzono we współpracy z ośrodkami naukowymi we Francji, Czechach, Ukrainie oraz Polsce w ramach grantu KBN oraz Programu NANOMAG Europejskiej Fundacji Naukowej (ESF). Uzyskano szereg interesujących wyników, dotyczących procesów magnesowania warstw kobaltu osadzonych na podłożach miki i szafiru, otoczonych warstwami złota. Do najważniejszych można zaliczyć: (i) zaobserwowanie przejść fazowych związanych z reorientacją osi łatwej magnetyzacji: oś łatwa – łatwa płaszczyzna, (ii) zaobserwowanie zmian charakteru struktury domenowej indukowanych grubością kobaltu, (iii) ilościową analizę drastycznych zmian rozmiaru i typu struktury domenowej (określenie liczby centrów nukleacji i wymiaru fraktalnego) wywołanych zmianą grubości warstwy ferromagnetycznej, (iv) zbadanie wpływu struktury warstwy przykrywającej na lokalizację ścian koercji oraz właściwości struktury domenowej.

Podczas mojej kilkuletniej współpracy z Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung IFW w Dreźnie zajmowałam się modyfikacją mikroskopu magnetooptycznego do wizualizacji magnetycznych struktur domenowych z namagnesowaniem zorientowanym w płaszczyźnie. Efektem tej współpracy, realizowanej w ramach Europejskiego projektu NANOMAG-LAB, było uruchomienie nowego układu mikroskopowego opartego na specjalistycznych diafragmach modyfikujących obszar obserwacji w obrazie konoskopowym. Takie rozwiązanie dało możliwość obserwacji struktur magnetycznych z namagnesowaniem zarówno prostopadłym, jak i płaszczyznowym, zgodnie z geometrią podstawowych konfiguracji Kerra (polarna, podłużna i poprzeczna), o bardzo wysokiej rozdzielczości obrazowania, sięgającej do 400nm.

Kolejne badania, prowadzone z moim aktywnym udziałem, dotyczyły wpływu parametrów struktury warstw otaczających (pokrywającej, buforowej) na właściwości i procesy magnesowania w pojedynczych ultracienkich warstwach (np. kobaltu i żelaza). Badania prowadzono w funkcji takich parametrów, jak grubość, morfologia, skład chemiczny (Au, Ag, Mo, V, Cr, Pt) warstw otaczających. Główne wyniki dotyczyły: (i) modyfikacji koercji warstwy kobaltu poprzez zmianę geometrii oraz rodzaju warstw otaczających, w szerokim zakresie ich grubości; (ii) przestrzennego modelowania struktur domenowych indukowanych grubością warstw: ferromagnetycznej, buforowej oraz przykrywającej, (iii) drastycznych zmian rozmiarów magnetycznych struktur domenowych (o kilka rzędów wielkości) w zakresie reorientacji magnetyzacji.

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 włączałam się w badania właściwości magnetycznych tych

materiałów. Wykorzystując techniki magnetoptyczne, zajmowałam się obserwacją i analizą struktur domenowych oraz procesów magnesowania w szerokim zakresie grubości warstwy magnetycznej oraz zmiennej wielokrotności. Szczególnie interesujące wyniki uzyskano dla układów sprzężonych magnetostatycznie. Uczestniczyłam także w analizie gradientowych ścian domenowych oraz ich zmian pod wpływem bombardowania jonowego [*Physical Review Letters* 105, 067202 (2010)].

Brałam również udział w badaniach magnetycznej anizotropii i procesów magnesowania w warstwach Pt/Co/Pt. Na uwagę zasługuje projekt jednorodnego naświetlania cienkiej warstwy magnetycznej Pt/Co/Pt jonami Ga^+ [*Applied Physics Letters* 95, 022502 (2009)]. Projekt był realizowany we współpracy z Laboratoire de Physique des Solides, Univ. Paris-Sud, Orsay Cedex oraz Ion Beam Physics and Material Research, Forschungszentrum Dresden-Rossendorf, Dresden. Badania pokazały, że pod wpływem implantacji jonami Ga^+ , w warstwie kobaltu z namagnesowaniem w płaszczyźnie następuje reorientacja magnetyzacji do kierunku prostopadłego.

W ostatnich latach brałam udział w badaniach uporządkowania magnetycznego w ultracienkich warstwach kobaltu osadzonych na podłożach schodkowych. Uczestniczyłam również w badaniach procesów magnesowania w nanodrutach permalojowych oraz kobaltowych mikrodrutach amorficznych z cyrkularną strukturą domenową przy wykorzystaniu wysokorozdzielczej mikroskopii magnetoptycznej z detekcją płaszczyznowej składowej magnetyzacji.

W ostatnim okresie zajmowałam się także wizualizacją i analizą obrazów struktur domenowych w przestrzennie strukturyzowanych cienkich warstwach granatów (Co/YIG, Py/YIG). W materiałach tych obserwowane są ciekawe efekty fotomagnetyczne oraz możliwość wzbudzania fal spinowych.

Białystok, 2012.02.04

Hane Tekeli