

Poznań 2018.04.23

Dr hab. Maciej Urbaniak  
Instytut Fizyki Molekularnej PAN w Poznaniu

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Kingi Aleksandry Lasek  
pod tytułem  
„Optymalizacja mechanizmów fizycznych indukujących prostopadłą orientację wektora  
namagnesowania w heterostrukturach typu magnetyczne złącze tunelowe”

Rozprawa doktorska p. mgr inż. Kingi Aleksandry Lasek poświęcona jest zbadaniu szerokiego spektrum zjawisk fizycznych prowadzących do występowania prostopadłej anizotropii magnetycznej w otrzymanywanych metodą epitaksji cienkowarstwowych układach magnetycznych typu metal ferromagnetyczny/izolator, metal ferromagnetyczny/izolator/metal ferromagnetyczny, metal ciężki(szlachetny)/metal ferromagnetyczny. Jako metalu ferromagnetycznego użyto w pracy kobaltu lub stopu  $\text{Co}_{0,9}\text{Fe}_{0,1}$ . Interfejsy w badanych układach modyfikowane były poprzez stosowanie nominalnie pojedynczych warstw złota a swobodne powierzchnie ferromagnetyka również poprzez mechaniczne pokrycie warstwą organiczną. Dodatkowo, poza głównym nurtem rozprawy, Autorka zaprezentowała wstępne wyniki badań anizotropii magnetycznej w dwu- i trój-warstwach  $[\text{Co}_{0,9}\text{Fe}_{0,1}/\text{Ni}]_n$ . Praca wykonana została w Zespole Cienkich Warstw Metalicznych i Heterostruktur magnetycznych Instytutu Fizyki PAN w Warszawie pod kierunkiem Prof. dr hab. Piotra Przysłupskiego oraz promotora pomocniczego Dr inż. Leszka Gładczuka.

Praca ma charakter doświadczalny i poświęcona jest aktualnym problemom badanym w wiodących laboratoriach na całym świecie. Poprzez podjętą przez Doktorantkę tematykę, rozprawa wpisuje się doskonale w nurt badań dotyczących spintroniki, to jest dziedziny fizyki ciała stałego, w której łączy się elektryczne i magnetyczne manifestacje właściwości elektronu w celu wytworzenia nowych urządzeń i materiałów. Pełniejsze poznanie mechanizmów prowadzących do występowania anizotropii prostopadłej, prócz walorów czysto poznawczych, ma zasadnicze znaczenie dla rozwoju współczesnych technologii informatycznych. W szczególności jest to istotne dla rozwoju pamięci operacyjnych, kolejnego po magnetycznych pamięciach masowych obszaru technologii, w którym efekt ten, w połączeniu ze zjawiskiem magnetooporu, umożliwi zmniejszenie rozmiarów urządzeń przy jednoczesnym zwiększeniu ich stabilności termicznej.

Do badania struktury uzyskiwanych w ramach realizacji rozprawy układów warstwowych wykorzystana była odbiciowa dyfrakcja elektronów (ang. RHEED), a do uzyskania ilościowych informacji o interfejsach Autorka posłużyła się spektroskopią fotoelektronów (ang. XPS) i elektronów Augera. W trakcie realizacji pracy Autorka korzystała ze spektroskopii rezonansu magnetycznego oraz magnetometrii z użyciem interferometru kwantowego do badania konfiguracji magnetycznej próbek. Wyniki doświadczalne uzupełnione są przez rozbudowaną analizę ilościową, prowadzoną z wykorzystaniem modelu makrospinu w formalizmie Stonera oraz Landaua-Lifszycy-Gilberta dla badań dynamiki namagnesowania. Modelowanie krzywych przemagnesowania oraz zależności rezonansowych, wykorzystane zostało do uzyskania usystematyzowanego opisu wpływu morfologii badanych warstw na ich właściwości magnetyczne.

Wyniki przedstawione w rozprawie doktorskiej są zamieszczone w czterech pracach opublikowanych w recenzowanych czasopismach o zasięgu międzynarodowym i wysokim czynnikiem oddziaływania (IF): J. Appl. Phys, J. Magn. Mater., J. Phys. D: Appl. Phys i Scripta Materialia. W jednej z tych prac Doktorantka jest pierwszym współautorem. Ponadto Autorka rozprawy siedmiokrotnie prezentowała wyniki swoich badań na konferencjach, w tym, co zasługuje

na podkreślenie pięciokrotnie była pierwszym autorem doniesienia, a w trzech przypadkach prezentowała swoje wyniki ustnie.

Rozprawa doktorska p. mgr inż. Lasek obejmuje w całości 130 stron, w tym tekst zajmuje 108 stron. Bibliografia zawiera około 140, dobrze dobranych, pozycji, co pozytywnie świadczy o wysiłku jaki Autorka podjęła w celu zapoznania się z aktualnym stanem wiedzy w dziedzinie, której praca dotyczy. Rozprawa podzielona jest na dwie zasadnicze części poprzedzone wstępem, zawierającym między innymi motywację i cel pracy. Całość kończy krótkie podsumowanie uzyskanych wyników. Ze względu na różnorodność opisywanych układów Autorka zdecydowała się zamieścić szczegółową dyskusję uzyskanych wyników w rozdziałach opisujących ich badanie. Główna część pracy obejmuje obszerny, ponad 40-stronicowy i zawarty w 4 rozdziałach, przegląd literatury wraz z omówieniem podstaw stosowanych metod eksperymentalnych i analitycznych oraz „Część doświadczalną”, podzieloną na 4 rozdziały, w której zawarty jest opis uzyskanych rezultatów wraz z ich analizą. W tym miejscu pozwolę sobie na wątpliwości co do tytułu zbiorczego pierwszej zasadniczej części pracy. Sądzę, że sformułowanie „Aktualny stan wiedzy i...” lepiej odzwierciedlałoby prezentowane w niej zagadnienia bez sugerowania „teoretycznego” charakteru rozprawy. Układ pracy jest logiczny co ułatwi czytelnikowi zapoznanie się z prezentowanymi wynikami, jednak w rozprawie zdarzają się fragmenty zdające się świadczyć, że Autorka uznaje niektóre fakty za oczywiste, zapominając, że nie wszyscy potencjalni odbiorcy posiadają szczegółową wiedzę w zakresie poruszanych przez nią zagadnień. Poniżej omówię bardziej szczegółowo zawartość poszczególnych rozdziałów pracy abstrahując na tym etapie od wskazywania usterek i błędów natury redakcyjnej.

W części zatytułowanej „Wstęp - motywacja i cel pracy” Autorka, dając na początku zwięzły opis 120-letniej historii zapisu informacji z wykorzystaniem materiałów magnetycznych, uzasadnia wybór tematyki podjętej w pracy doktorskiej potencjalnymi zastosowaniami badanych układów w technologiach informatycznych. Podkreślone zostało znaczenie układów wykorzystujących zjawisko magnetooporu tunelowego (ang. TMR) i transferu spinowego moment pędu; wskazano na przełomowy charakter zastąpienia tlenku Al warstwą MgO, jako warstwy oddzielającej ferromagnetyki. Autorka poświęca w tej części pracy wiele miejsca prostopadłej anizotropii magnetycznej (ang. PMA), która pozwala w cienkich warstwach zneutralizować działanie silnej anizotropii kształtu preferującej ustawienie momentów magnetycznych w płaszczyźnie próbek i słusznie wskazuje na korzyści jakie daje jej wykorzystanie w pamięciach operacyjnych. Wymienione są w tym miejscu różne układy warstwowe wykazujące PMA, również ze względu na obecność interfejsu między ferromagnetykiem i materiałem organicznym. Celem pracy, zadeklarowanym w tym fragmencie rozprawy, było poszerzenie stanu wiedzy oraz przyczynienie się „do udoskonalenia technologii wytwarzania magnetycznych złączy tunelowych do zastosowań w urządzeniach pamięci masowych” i pokrewnych obszarach.

W pierwszym rozdziale „Części teoretycznej i przeglądu literatury” Autorka omawia podstawy działania urządzeń spintronicznych. Przedstawione są tam takie zagadnienia jak polaryzacja spinowa w ferromagnetykach, zjawisko gigantycznego magnetooporu (ang. GMR), zjawisko TMR w magnetycznych złączach tunelowych, efekt indukowanego prądem spinowym transferu momentu pędu, oddziaływania międzywarstwowe typu RKKY, magnetostatyczne oraz poprzez mostki ferromagnetyczne. Rozdział ten napisany jest poprawnie, jednak Autorka nie ustrzegła się pewnych niedociągnięć. Przykładowo w pierwszym zdaniu rozdziału 1.2 *nanotechnologia* ograniczona została w zasadzie do spintroniki. Z kolei opis modelu Motta na str. 10 może błędnie sugerować przestrzenne rozdzielanie kanałów spinowych. Opis nad rys. 1.2 mówi o zmianie kanału spinowego w przypadku elektronu poruszającego się między sąsiednimi warstwami magnetycznymi. Zwykle, i takie zachowanie wystarczy do zaobserwowania efektu GMR, elektron nie „zmienia kanału spinowego” lecz kanał do którego należy zmienia swój charakter, np. z mniejszościowego na większościowy, w warstwie o innej orientacji momentu magnetycznego. Sądzę również, że podczas

omawiania sprzężenia pośredniego rys. 1.3 mógłby być zastąpiony zależnością eksperymentalną [np. S.S.P. Parkin *et al.*, PRL 1994,  $GMR(t_{Co})$ ] oraz, że należałoby w tym miejscu zwrócić uwagę na niekoherentność periodów sieci krystalicznej i oscylacji RKKY prowadzącej do zwiększenia rzeczywiście obserwowanego periodu oscylacji – efekt „aliasingu”. Podrozdział 1.3 dotyczący efektu TMR uważam w dużej części za zbędny. Choć Autorka obszernie, na 5 stronach, i dość wnikliwie, dowodząc tym swojej znajomości tematyki, prezentuje magnetotransport w strukturach z izolującą przekładką to ze względu na brak w rozprawie eksperymentów dotyczących bezpośrednio efektu TMR rozdział może być traktowany jako rozbudowane uzasadnienie zajęcia się układami na bazie MgO. Podrozdział 1.3.3, bardzo zwięźle opisujący oddziaływania międzywarstwowe w układach z warstwą izolującą, ma odniesienia do prezentowanych w pracy eksperymentów i może pomóc czytelnikowi w zrozumieniu omawianych zagadnień. Podrozdział 1.4, z powodów analogicznych jak poprzedni, uważam za zbędny.

Rozdział 2 wprowadza czytelnika w podstawowe, dla zrozumienia rozprawy, zagadnienia dotyczące magnetyzmu cienkich warstw. Osobiście uważam, że powinien on poprzedzać opis podstaw działania urządzeń spintronicznych, choć nie wykluczam, że Autorka chciała w ten sposób zapoznać czytelnika w pierwszej kolejności z tymi zjawiskami, które były głównym obiektem przedstawionych badań. W rozdziale 2 omówione jest oddziaływanie wymienne jako przyczyna powstawania porządku ferromagnetycznego, mechanizmy fizyczne prowadzące do powstania anizotropii magnetycznej, w tym oddziaływanie dipolowe oraz spin-orbita, zjawisko reorientacji spinowej i mechanizmy prowadzące do występowania przyczynku energetycznego preferującego prostopadłe w stosunku do powierzchni warstwy ustawienie momentów magnetycznych. Dwa podrozdziały (2.5.2 i 2.5.3) poświęcone są odpowiednim źródłom PMA w układach typu metal magnetyczny/metal niemagnetyczny. Rozdział jest dobrze napisany, jednak i w nim znalazło się kilka budzących wątpliwości sformułowań. Przykładowo opis wzoru 2.1 sugeruje, że całka wymiany zależy od kąta między oddziałującymi spinami. Nieprecyzyjne jest również, zdanie na str. 22 zaczynające się od „Energia anizotropii magnetycznej pomiędzy dwoma kierunkami krystalograficznymi...”: zdanie może dotyczyć 3 kierunków. Niektóre zdania sformułowane są zbyt stanowczo, np. drugie zdanie pierwszego akapitu na st. 24 wyklucza magnetometrię wektorową pozwalającą mierzyć np. składowe momentów magnetyczne skierowane prostopadłe do zewnętrznego pola magnetycznego.

Rozdział 3 zawiera syntetyczny opis stosowanych przez Autorkę technik pomiarowych: rezonansu ferromagnetycznego (ang. FMR), magnetometrii SQUID i spektroskopii fotoelektronów XPS. Omówiona jest również budowa wykorzystywanych w badaniach przyrządów. W opisie techniki FMR brakuje mi pokazania czytelnikowi powodu dla, którego w eksperymencie otrzymujemy pochodną linii rezonansowej – modulacje pola zewnętrznego oraz choć krótkiej informacji o czynnikach wpływających na szerokość linii rezonansowej (pokazanej na bardzo zwięźle opisanym rys. 3.2). Z kolei w opisie magnetometru przydatne byłoby podanie zakresu momentów magnetycznych, choćby szacunkowe, badanych w rozprawie próbek.

Czwarty rozdział pracy zawiera zwięzły opis stosowanych przez Autorkę metod analizy danych. Pierwsza część sprowadza się do wyprowadzenia ogólnej zależności między częstością rezonansową, kierunkiem zewnętrznego pola i równowagowym położeniem momentu magnetycznego próbki (w przybliżeniu makrospinu). Sądzę, że w tym miejscu celowe byłoby pokazanie przykładowych zależności analitycznych częstotliwości rezonansowej w funkcji pola dla kilku wartości kąta między polem przyłożonym a płaszczyzną próbki, na przykład na podstawie danych analogicznych do prezentowanych na rys. 6.2. Druga część rozdziału poświęcona jest quasistatycznym krzywym przemagnesowania w formalizmie Stonera-Wohlfahrta. Autorka wyprowadza pole nasycające dla pola przyłożonego prostopadłe do osi łatwej oraz pokazuje przykładowe krzywe namagnesowania (rys. 4.2). Pole nasycające zdefiniowane jest w tym przypadku (pierwszy akapit podrozdziału 4.2) zbyt rygorystycznie, lepiej posługiwać się pojęciem

nasylenia technicznego lub mówić o w przybliżeniu równoległym ustawieniu [A. Aharoni, Phys. Rev. B 45, 1030 (1992)]. W tym fragmencie pracy oczekiwałbym opisu metody przeprowadzania symulacji zależności  $M(H)$  – np. przerywana krzywa na rys. 4.2.

Druga zasadnicza część pracy, nazwana przez Autorkę „Częścią Doświadczalną”, zaczyna się od niespełna 5-stronicowego rozdziału (nr 5) opisującego technologię wytwarzania cienkich warstw oraz krótką charakterystykę ich wzrostu. W tym miejscu warto podkreślić jest opanowanie przez Doktorantkę techniki osadzania warstw z wiązki molekularnej (ang. MBE) dzięki czemu wszystkie próbki przez nią badane zostały wytworzone przez nią samodzielnie. Podrozdział 5.1 opisuje metodę jako taką oraz budowę użytej do procesu MBE aparatury. Drugie zdanie tego fragmentu jest dla mnie niejasne; domyślam się, że chodzi o efektywną szybkość osadzania materiału na podłożu. W drugim podrozdziale przedstawiono sposoby nanoszenia poszczególnych rodzajów podwarstw składowych badanych struktur. Wszystkie warstwy wielokrotnie nanoszone były na bufor  $\text{Mo}(20\text{ nm})/\text{Au}(20\text{ nm})$  naporowany na szafirowych podłożach. Warstwy stopowe  $\text{Co}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}$  uzyskiwane były poprzez jednoczesne naporowywanie ze źródeł pierwiastkowych. Część badanych warstw (Co, MgO), stosując ruchomą przesłonę, uzyskiwano w postaci klina o nachyleniu  $0.1\text{ nm/mm}$ . Warstwy MgO uzyskiwano z targetu stopowego przy użyciu działa elektronowego. Rozdział kończy się przedstawieniem rezultatów badania, metodą RHEED oraz transmisyjną wysokorozdzielczą mikroskopią elektronową (ang. HRTEM), struktury krystalograficznej, zawierającego istotne dla opisywanych w dysertacji badań interfejsy, układu  $\text{Mo}/\text{Au}/\text{Co}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}/\text{Au}/\text{MgO}/\text{Au}/\text{Co}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}/\text{Au}$ . Obrazy dyfrakcyjne wskazują, że uzyskane warstwy, co najmniej do pierwszej subwarstwy Au, rosną w postaci epitaksjalnej. Warstwa MgO rośnie już trójwymiarowo, a subwarstwy leżące powyżej niej wykazują wzrost polikrystaliczny. Obrazy HRTEM układu  $\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}/\text{MgO}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}$  potwierdzają gładkość pierwszego interfejsu oraz epitaksjalny wzrost pierwszej warstwy Co. Wyżej położone subwarstwy charakteryzują się zwiększoną długookresową szorstkością przestrzenną a wzrost górnej warstwy Co jest częściowo zaburzony ze względu na strukturę podłoża MgO. Zamieszczone dane wskazują zatem, że badane warstwy wielokrotnie posiadają uporządkowaną strukturę. Umożliwiło to Autorce w sposób prawidłowy skorelować ich morfologię z właściwościami magnetycznymi, co jest przedmiotem dalszych części rozprawy.

Rozdział 6, zawiera opis badań wpływu pojedynczej warstwy Au osadzonej na interfejsie Co/MgO na efektywną anizotropię magnetyczną w strukturach  $\text{Au}/\text{Co}/(\text{Au})/\text{MgO}/\text{Au}$ . Jako układy referencyjne zastosowano warstwy  $\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}$  oraz  $\text{Au}/\text{Co}/\text{MgO}/\text{Au}$ . Zależności wartości pola rezonansowego  $H_{\text{rez}}$  efektu FMR od kąta  $\theta_H$  między normalną do płaszczyzny a kierunkiem przyłożonego pola magnetycznego wskazują, że dla grubości subwarstwy Co  $t_{\text{Co}} = 3.0\text{ nm}$  wszystkie układy charakteryzują się anizotropią magnetyczną typu łatwa płaszczyzna lub w płaszczyźnie. Dla  $t_{\text{Co}} = 2.2\text{ nm}$  warstwy, w których subwarstwa Co otoczona jest z obu stron złotem wykazują słabą zależność  $H_{\text{rez}}$  od kąta  $\theta_H$  wskazując na wzrost przyczynku do anizotropii preferującego prostopadłą do płaszczyzny ( $\theta_H = 0^\circ$ ) orientację momentów magnetycznych. Dalsze zmniejszenie grubości subwarstw Co, do  $t_{\text{Co}} = 1.8\text{ nm}$ , prowadzi do dominacji anizotropii prostopadłej nad anizotropią kształtu w przypadku układów  $\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}$  i  $\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}/\text{MgO}/\text{Au}$  przejawiającego się reorientacją spinową – oś łatwa skierowana jest prostopadle do płaszczyzny warstw. W układzie  $\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}/\text{MgO}/\text{Au}$  grubsza warstwa Au na interfejsie Co/MgO przyczynia się do pogłębienia minimum w zależności  $H_{\text{rez}}(\theta_H)$  dla  $\theta_H = 0^\circ$  świadcząc o decydującej dla anizotropii powierzchniowej roli złota na interfejsie. W tym miejscu wypada zauważyć, że przywiązanie Doktorantki do układu cgs pociąga za sobą pewne niebezpieczeństwa. Ofiarą tego przywiązania stał się opis osi  $y$  na rysunkach 6.2 i 6.3: wartości pól rezonansowych zanizone są w stosunku do tych prezentowanych w oryginalnej pracy (L. Gładczuk *et al.*, J. Appl. Phys. 116 (2014) 233909); na podobne redakcyjne niedociągnięcia zwracam uwagę w końcowej części recenzji. Zależności  $H_{\text{rez}}(t_{\text{Co}})$  przedstawione na rys. 6.3 pokazują, że grubości  $t_{\text{Co}}$  dla których prostopadłe i równoległe

poła rezonansowe osiągają jednakowe wartości są znacznie mniejsze dla układów z interfejsem Co/MgO pozbawiony subwarstwy Au świadczą o jego nieefektywności w zakresie wymuszania PMA. Wyznaczone na podstawie dopasowania do zależności  $H_{rez}(\theta_H)$  wartości anizotropii efektywnej pozwoliły Doktorantce wyznaczyć powierzchniowy przyczynk do PMA i pokazać, że pokrycie interfejsu Co/MgO cienką warstwą Au pozwala uzyskać wartości współczynnika powierzchniowej PMA, wynoszące  $1.6 \text{ mJ/m}^2$ , b. zbliżone do układów Au/Co/Au. W tym miejscu nasuwa mi się pytanie, czy możliwe jest określenie, na podstawie zebranych przez Doktorantkę danych, przyczynków do anizotropii powierzchniowej pochodzących od poszczególnych interfejsów Co w układzie Au/Co/MgO, podobnie jak w analizie danych przedstawionych na rys. 7.5. Posługując się techniką XPS Autorka rozprawy pokazała, że na interfejsie Co/MgO dochodzi do tworzenia tlenków Co nawet w obecności cienkiej, i z tego powodu nieciągłej, subwarstwy złota.

W rozdziale siódmym mgr inż. Lasek poszukuje alternatywnych możliwości wpływania na powierzchniowy przyczynk do PMA w warstwach wielokrotnych na bazie Co. Poprzez analogię do doniesień literaturowych dotyczących grafenu, omówionych w podrozdziale 2.5.3, Autorka zdecydowała się na weryfikację wpływu oleju próżniowego na magnetyczne zachowanie subwarstw Co. Podejście to jest z jednej strony nowatorskie, z drugiej jednak strony duża liczba związków chemicznych zawarta w tak dobranym pokryciu organicznym utrudnia interpretację wyników. Autorka zdaje sobie z tego sprawę, co podkreśla zarówno w oryginalnej publikacji w J. Phys. D, jak i podsumowaniu rozdziału, w którym daje nam nadzieję na to, że problem ten będzie w przyszłości podjęty. W pierwszej części rozdziału Doktorantka przedstawia porównawczą analizę krystalograficzną warstw pokrytych węglowodorami (H-c) – struktura Au/Co/H-c dowodząc, że pokrycie nie zmienia odległości międzypłaszczyznowych Co wzdłuż osi  $c$  a tym samym wpływ magnetycznej anizotropii naprężeń na obserwowane efekty może być pominięty. Przeprowadzając pomiary efektu FMR, analogiczne do opisanych w rozdziale 6, Autorka pokazała, że zależności  $H_{rez}(\theta_H)$  wskazują na istnienie powierzchniowego przyczynku do PMA związanego z obecnością warstwy organicznej oraz, co jest najważniejszym wynikiem tej części pracy, że przewyższa on energetycznie przyczynk od czystego interfejsu Co/Au. Posługując się analizą zależności  $M(H)$  Doktorantka wykazała brak w układzie tzw. anizotropii wymiany czyli związanego z obecnością antyferromagnetyka przesunięcia krzywej przemagnesowania od symetrycznego położenia względem linii  $H = 0 \text{ A/m}$ . W konkretnym przypadku warstw Co oznacza to niewystępowanie tlenków Co na zewnętrznej powierzchni subwarstwy kobaltu. Analiza widm XPS posłużyła Autorce do potwierdzenia, że na warstwie Co pokrytej H-c nie występują istotne ilości CoO. Wpływ warstwy organicznej na PMA tłumaczony jest redystrybucją ładunku na interfejsie Co/H-c i działaniem związanego z nią pola elektrostatycznego. Wyjaśnienie to nie jest dla mnie jasne, sadzę że może to być efekt analogiczny do zmian anizotropii magnetycznej wywołanych przyłożeniem zewnętrznego pola do układów typu ferromagnetyk/izolator – celowe byłoby moim zdaniem zamieszczenie w tym miejscu pracy schematu wyjaśniającego czytelnikowi proponowany przez Autorkę model PMA.

Ostatni zasadniczy rozdział rozprawy opisuje wpływ grubości subwarstwy MgO,  $t_{MgO}$ , na anizotropię magnetyczną układów Mo/Au/Co<sub>0.9</sub>Fe<sub>0.1</sub>/Au/MgO/Au/Co<sub>0.9</sub>Fe<sub>0.1</sub>/Au. Subwarstwę tlenku wykonano w formie klina, o grubości od 0 nm do 1 nm zapewniając w ten sposób jednakowe warunki nanoszenia dla całego spektrum próbek. Jako próbki referencyjne zastosowano układ z  $t_{MgO} = 3 \text{ nm}$ , z ograniczonym oddziaływaniem między subwarstwami magnetycznymi, oraz warstwy wielokrotne z jedną subwarstwą Co<sub>0.9</sub>Fe<sub>0.1</sub> naniesioną przed ( $F_B$ ) lub po ( $F_T$ ) warstwie MgO. Kątowe zależności pól rezonansowych  $H_{rez}(\theta_H)$  uzyskana dla próbek referencyjnych wskazują, że warstwa  $F_B$  charakteryzuje się anizotropią typu prostopadłego a subwarstwa  $F_T$  anizotropią „o osi łatwej namagnesowania zorientowanej w płaszczyźnie warstwy”. W świetle sformułowań z oryginalnej pracy Autorki (JMMM, 2017), gdzie użyte jest określenie „easy-plane MA” (MA -ang. anizotropia

magnetyczna) mam wątpliwość czy warstwa  $F_T$  posiada anizotropię typu łatwa płaszczyzna czy w płaszczyźnie – nie znalazłem opisu zależności własności magnetycznych od kąta  $\varphi_H$  (rys. 2.4). Wartość pola rezonansowego warstwy  $F_T$  wynosząca według opisu w tekście 9 kOe wydaje mi się lekko zawyżona (rys. 8.2). Zależności  $H_{rez}(\theta_H)$  dla układu zawierającego dwie subwarstwy ferromagnetyczne zmierzone dla różnych  $t_{MgO} \geq 0.7$  nm nie wykazują istotnych zmian pola rezonansowego subwarstwy  $F_T$  oraz duże zmiany, wskazujące na zanik przyczynku preferującego PMA, dla warstwy  $F_B$ . Pętle histerezy pełnych warstw pokazują, że dla  $t_{MgO} \leq 0.78$  nm wypadkowa zależność  $M(H)$  zmienia charakter z dwuetapowego przemagnesowania, gdy jedna z warstw przełącza się w kierunku łatwym a druga w trudnym, do sytuacji w której zewnętrzne pola w obu warstwach jest prostopadłe do ich osi łatwych. Na podstawie symulacji tych zależności w formalizmie Stonera Doktorantka oszacowała stałe anizotropii obu warstw magnetycznych, oddające proporcjonalność energii do kwadratu i czwartej potęgi kosinusa kąta polarnego momentu magnetycznego  $\theta_M$  (rys. 2.4). Na podstawie tak uzyskanych wartości, dla szeregu grubości przekładki MgO, Autorka wyznaczyła diagram fazowy pokazujący orientację momentów magnetycznych w obu warstwach w funkcji  $t_{MgO}$ . Rozdział kończy oszacowanie stałej anizotropii powierzchniowej związanej z interfejsem  $Co_{0.9}Fe_{0.1}/Au/MgO$ . Opis metody użytej do tego szacowania nie jest dla mnie w pełni jasny ale na podstawie informacji o próbkach jakimi dysponowała Autorka wnioskuję, że każdy z punktów na rys. 8.11 wyznaczony został na podstawie pola nasycenia obserwowanego, dla jednej próbki, dla pola przyłożonego prostopadłe.

W rozprawie występują niedociągnięcia natury edytorskiej i gramatycznej oraz nieliczne natury merytorycznej. Niektóre z nich, najbardziej charakterystyczne lub mogące utrudnić odbiór pracy przez czytelnika, z obowiązku recenzenta wymieniam poniżej:

1. W kilku miejscach, ze względu na błąd przeliczenia, wartości podane z użyciem jednostek układu cgs nie odpowiadają wartościom z oryginalnych prac podanych w jednostkach SI. Dotyczy to w szczególności: rys. 6.2, rys. 6.3 i rys. 6.4 (opis osi pionowych), rys. 7.5 (opisy obu osi) oraz tabeli 6.1. Na rys. 7.5 dotyczy to również wartości wsp.  $K_v$ . Wątpliwość budzi inny niż w oryginalnej pracy stosunek  $K_v$  do niepewności jego wyznaczenia.
2. Niektóre cytowane doniesienia literaturowe nie są zamieszczone w spisie literatury. Dotyczy to na przykład pozycji [Bow\_2001], [Nee\_1962], [Wei\_1983] oraz [Fre\_1992].
3. Na str. 75 znajduje się odniesienie do nieistniejącego wzoru (6.1).
4. W pewnych miejscach (np. podpisy rysunków 6.2 i 7.3) odniesienie się bezpośrednio do równania 2.8 może wprowadzić w błąd, gdyż nie opisuje ono zależności  $H_{rez}(\theta_H)$  a jedynie zależność energii od orientacji momentu magnetycznego.
5. Stosowanie symboli funkcji trygonometrycznych bez argument – str. 50.
6. Brak konsekwencji w stosowaniu symboli – równania 1.1 i 1.4. Symbole stosowane w równaniu 1.4 zdefiniowane zostały dwukrotnie (w tekście głównym oraz w podpisie pod rysunkiem 1.4).
7. Stosowanie zawężających definicji. Pojęcie grupy, na str. 15, zdefiniowane jest w sposób sugerujący, że musi ono dotyczyć operacji geometrycznych.
8. Literówki. Np.: str. 1 – 1889 zamiast 1898, str. 55 - „działa elektoronowego”. Nicstosowanie w niektórych miejscach indeksów dolnych (spis literatury, np. pozycja [Las\_2017], [Sin\_2002]).
9. Stosowanie angielskich spójników w polskim tekście (podpis rys. 8.7 i ostatnie zdanie str. 92 ).
10. Niektóre skróty wyjaśniane są dwu, a nawet trzykrotnie (TMR – str. 13, XPS, str. 42).

Zdarza się, że wprowadzony skrót nie jest używany (SyAF – str. 12), lub nie w pełni odpowiada polskiemu terminowi (str. 18: „*sprężenia dipolowego (ang. stray fields)*”).

11. Używanie żargonowych zwrotów. Np. „*Krzywa  $M(H)$  w prostopadłym kierunku zewnętrznego pola magnetycznego*” na str. 28, lub skrótów myślowych: „*wzrasta w kierunku (110)*.” (str. 55). Szyk przymiotników w wyrażeniach takich jak „*magnetyczny meta*” nie jest typowy dla języka polskiego.

12. Niej jest dla mnie jasny cel stosowania słowa „*Symbole*.” w opisach kilku rysunków.

Wymienione powyżej drobne niedociągnięcia mogą utrudnić zrozumienie treści jakie chciała przekazać czytelnikowi Doktorantka, nie wpływają jednak na moją pozytywną ocenę rozprawy.

Do najważniejszych osiągnięć przedstawionych w rozprawie zaliczam systematyczne zbadanie wpływu morfologii interfejsu Au/MgO na występującą w układzie magnetyczną anizotropię prostopadłą oraz podjęcie stosunkowo nowej tematyki wpływu pokrycia subwarstw magnetycznych materiałami organicznymi na zachowanie cienkich warstw Co.

Podsumowując stwierdzam, że przedłożona mi do recenzji rozprawa napisana jest w sposób interesujący i podejmuje ważne z punktu widzenia współczesnej nauki i technologii zagadnienia. Wyniki zawarte w pracy świadczą o wysokim stopniu sprawności Doktorantki w posługiwaniu się szerokim spektrum technik eksperymentalnych a wnikliwa analiza danych dowodzi opanowania przez nią podstaw teoretycznych badanych zjawisk.

Uważam, że rozprawa doktorska p. mgr inż. Kingi Aleksandry Lasek pt. „*Optymalizacja mechanizmów fizycznych indukujących prostopadłą orientację wektora namagnesowania w heterostrukturach typu magnetyczne złącze tunelowe*” spełnia warunki określone w Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. z 2017 r. poz. 1789) i wnoszę o dopuszczenia Pani mgr inż. Kingi Aleksandry Lasek do kolejnych etapów przewodu doktorskiego.

