

Wpłynęło dnia ..... 14. 09. 2022 .....  
Zarejestrowano pod nr .....  
Podpis ..... *dm* .....

Warszawa, 9 września 2022 r.

prof. dr hab. Andrzej Wawro  
Instytut Fizyki PAN w Warszawie

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgra inż. Stanisława Marka Łazarskiego pt.:**  
***Dynamika i przełączanie magnetyzacji indukowane prądami spinowymi***  
***w heterostrukturach metal ciężki/ferromagnetyk***  
**realizowanej w dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika**  
**w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie**

Recenzowana rozprawa doktorska została przygotowana przez mgra inż. Stanisława Łazarskiego na Wydziale Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie pod opieką naukową dra hab. inż. Witolda Skowrońskiego (prof. AGH) w dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika. Zasadniczo jest ona poświęcona analizie możliwości manipulowania kierunkiem namagnesowania magnetycznych warstw składowych w anizotropowych wielowarstwowych strukturach, zawierających naprzemiennie ułożone warstwy ferromagnetyka (FM) i metalu ciężkiego (HM), za pomocą wywołanego prądu spinowego. Ponadto omówione są dynamiczne właściwości magnetyczne tych struktur, które objawiają się w szybkozmiennych polach magnetycznych.

Poruszana w rozprawie tematyka jest bardzo istotna zarówno w zakresie poznawczym (badania podstawowe), jak i aplikacyjnym (konstrukcja pamięci magnetycznych). Wpisuje się ona w szeroki nurt badań sztucznie wytworzonych nanostruktur prowadzonych w licznych renomowanych instytucjach naukowych. Nieustająca miniaturyzacja wymaga pełnej kontroli właściwości układów optycznych, elektrycznych czy magnetycznych o coraz mniejszych rozmiarach. Układy magnetyczne są jednymi z najintensywniej badanych i mają obecnie bardzo duży potencjał aplikacyjny. Do ich znaczenia przyczynił się rozwój relatywnie nowej gałęzi elektroniki – spintroniki, która wykorzystuje nie tylko ładunek elektryczny elektronu do sterowania jego przepływem, ale również jego spin, który powoduje, że pojedyncze elektrony zachowują się jak magnesy. Ta cecha umożliwia kontrolę przepływu prądu za pomocą pola magnetycznego oraz oddziaływanie ładunkowego prądu spolaryzowanego lub spinowego z namagnesowaniem obiektów o rozmiarach pojedynczych nanometrów. Obecnie duża część wysiłków badawczych nakierowana jest na wywoływanie kontrolowanej zmiany kierunku namagnesowania takich obiektów za pomocą prądu przy braku zewnętrznego pola magnetycznego. Jedną z możliwości jest transfer momentu magnetycznego elektronów (ang.: *spin transfer torque*, STT) odpowiedzialnych za przepływ spolaryzowanego prądu ładunkowego (zróżnicowana liczba elektronów o przeciwnych spinach, uzyskana zazwyczaj wskutek przepływu przez materiał FM). Jednak w takim podejściu krytyczna gęstość prądu (minimalna wartość, przy której obserwuje się przemagnesowanie), jest relatywnie duża. Wymagana moc powoduje, że proces przemagnesowania staje się energochłonny, a ilość wydzielanego ciepła może zniszczyć badaną strukturę. Bardziej efektywnym rozwiązaniem jest wykorzystanie

sprężenia spinowo-orbitalnego (ang.: *spin-orbit coupling*, SOC), prowadzącego do wywołania spinowego efektu Halla (SHE) lub efektu Rashby (RE). Generowany jest wtedy prąd spinowy (prostopadły do ładunkowego), unoszący moment (ang.: *spin-orbit torque*, SOT) odpowiedzialny za przemagnesowanie układu. Zaletą takiego rozwiązania jest mniejsza gęstość krytyczna prądu. Silne SOC występuje w metalach ciężkich (np. Re, Ir, Pt, Ta). Dlatego też bardzo intensywnie badanymi materiałami pod tym kątem są układy wielowarstwowe typu FM/HM. Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska zawiera opis badań właśnie tego typu heterostruktur.

Zawartość merytoryczna rozprawy oparta jest na czterech pracach współautorstwa doktoranta opublikowanych w czasopiśmie z listy JCR. Została ona przygotowana w języku angielskim w formie opisowej, uzupełnionej dwoma opublikowanymi artykułami, w których doktorant jest pierwszym współautorem. Można wyróżnić dwie jej zasadnicze części: wprowadzenie do zjawisk fizycznych, analizowanych w rozprawie, oraz omówienie uzyskanych wyników wraz z ich interpretacją. Pierwsza z nich jest bardzo wartościowa, ponieważ dobrze przygotowuje czytelnika do zakresu prowadzonych badań. Opis ten oraz długa lista bibliograficzna, zawierająca zarówno starsze prace podstawowe, jak również i te najnowsze, potwierdzają ogólną i aktualną wiedzę teoretyczną doktoranta z zakresu przynależnej dyscypliny.

Rozprawa rozpoczyna się deklaracją doktoranta dotyczącą jego oryginalnego wkładu w przygotowanie wymienionych prac. W dalszej kolejności pojawiają się streszczenia w języku polskim i angielskim, spis treści, lista wykresów, lista stosowanych skrótów oraz pełna lista publikacji, których doktorant jest współautorem. Po krótkim wprowadzeniu, uzasadniającym podjętą w rozprawie doktorskiej tematykę, następuje zasadnicza część pracy, która podzielona jest na 8 rozdziałów o zróżnicowanej długości. W pierwszych pięciu rozdziałach pokrótce omówione są kolejno następujące zjawiska: statyczne właściwości magnetyczne, efekt Halla, magnetoopór, mechanizm przekazania momentu spinowego i związane z nim sprężeniem spin-orbita oraz dynamika namagnesowania.

Szósty rozdział obejmuje opis uzyskanych wyników oraz ich interpretację i stanowi treść prac [P1], [P4], [P7] i [P9] z listy dorobku publikacyjnego doktoranta. Ich krótkie omówienie znajduje się w dalszej części niniejszej recenzji.

W jednostronicowym podsumowaniu, stanowiącym siódmą część rozprawy, wymieniono najistotniejsze jej osiągnięcia, podkreślając wytworzenie i zbadanie struktur o dwóch różnych anizotropiach magnetycznych warstw składowych, istotny wpływ sprężenia międzywarstwowego na dynamikę namagnesowania, możliwość przełączania namagnesowania warstwy za pomocą prądu bez udziału zewnętrznego pola magnetycznego oraz zalety niskoczęstotliwościowych pomiarów harmonicznych napięcia Halla w wyznaczeniu wielkości SOT.

Ostatnia, ósma część (Appendix) zawiera porównawczą analizę dynamiki namagnesowania warstw CoFeB rozdzielonych przekładką W, uzyskanych w dwóch różnych układach, w których stosowano dwu- i czterosondową metodę pomiarową. Analizie zostały poddane takie parametry, jak: intensywność i rozdzielczość sygnału

rezonansowego. Druga jego część zawiera opis układu służącego do wykonywania struktur litograficznych. Podana została również receptura procesu litograficznego.

Rozprawę kończy obszerna lista cytowanych w niej prac.

Poniżej omówione są pokrótce wyniki, będące podstawą recenzowanej rozprawy.

W pierwszej części, opartej na pracy [P1], opisane zostały badania serii magnetycznych złączy tunelowych o konfiguracji  $\text{CoFeB/MgO/CoFeB/W/CoFeB/MgO}$ , w której środkowa warstwa FM i wierzchnia izolatora miały zmieniające się grubości. W pewnych zakresach grubości tych warstw zaobserwowano występowanie prostopadłej anizotropii magnetycznej (PMA). Wyznaczono namagnesowanie nasycenia i oszacowano grubość nieaktywnej warstwy magnetycznej (ang.: *dead layer*). Stosując technikę VNA-FMR, zbadano dynamikę namagnesowania. Wyznaczono podatność magnetyczną oraz zidentyfikowano pochodzenie pików rezonansowych od poszczególnych warstw składowych. Z położenia pików rezonansowych została określona wartość PMA, którą następnie wykorzystano do dość dokładnego modelowania, opartego na formule Kittela, eksperymentalnej zależności dyspersyjnej zmierzonej dla poszczególnych warstw składowych. Wspomniano również o spadku oporu tunelowego złącza ze zmniejszaniem się grubości warstwy magnetycznej, ale tej informacji nie zilustrowano w rozprawie żadnym wykresem.

Druga, raportowana w rozprawie, praca [P4] poświęcona jest układowi  $\text{Ti/Co/Pt/Co/MgO/Ti}$ , typowemu dla grupy warstw FM/HM z dużym SOC. Pozwala on na efektywne generowanie prądu spinowego. Dzięki zróżnicowanej grubości uzyskano odmienne anizotropie w składowych warstwach Co, a zmiana grubości przekładki Pt umożliwiała regulowanie wielkości sprzężenia międzywarstwowego. Współistnienie tych dwóch zjawisk pozwoliło na kontrolowane zmiany kierunku namagnesowania górnej warstwy Co. Na podstawie badań dynamiki namagnesowania określono parametry transportu spinowego (spinowy efekt Halla i efekt Rashby). Wg mnie najbardziej wartościowym wynikiem jest pokazanie za pomocą pomiaru anomalnego efektu Halla (AHE), że pod wpływem prądu w połączeniu z SOT można przełączać kierunek namagnesowania cieńszej warstwy Co, która wykazuje prostopadłe do płaszczyzny namagnesowanie. Dla określonego zakresu grubości przekładki Pt proces ten jest również obserwowany przy braku zewnętrznego pola magnetycznego.

Trzecia praca [P7] ponownie opisuje właściwości metalicznych układów, w których rolę FM pełni warstwa CoFeB, a przekładki HM – warstwa Ta, która była jednocześnie źródłem prądu spinowego. Ich struktura krystaliczna była optymalizowana termicznie. Zakresy prowadzonych badań i uzyskanych wyników były podobne do tych z pracy [P4]. Za pomocą pomiarów AHE pokazano, że w pewnym zakresie grubości warstw FM i HM cieńsza warstwa CoFeB jest namagnesowana prostopadle do jej powierzchni. Na podstawie pomiarów rezonansu ferromagnetycznego wyznaczono anizotropię magnetyczną dla obu warstw FM oraz wielkość sprzężenia międzywarstwowego w zależności od grubości przekładki Ta. Nowością było zaobserwowanie sprzężenia zarówno ferromagnetycznego, jak i antyferromagnetycznego. W przypadku tego

drugiego nie udało się zarejestrować przełączania magnetycznego za pomocą prądu spinowego przy braku pola magnetycznego. Efekt ten był widoczny jedynie wtedy, gdy obie warstwy magnetyczne wykazywały tendencję do równoległego ustawienia namagnesowania.

W ostatniej części rozprawy doktorant nie wspomniał, że wyniki tu opisywane zostały opublikowane w pracy [P9]. Pomiary wykonano dla wielowarstw osadzonych na modyfikowanym buforze: Ta/Pt(d)/CoFeB/Ta oraz Ta/[Pt(d)/Ti]<sub>m</sub>/Pt(d)/CoFeB/Ta, w którym zmieniała się grubość d składowej warstwy Pt. Został podany doświadczalny protokół dla pomiarów oporu i efektywności spinowej Halla z wykorzystaniem niskoczęstotliwościowych harmoniczných napięcia Halla. Zastosowanie techniki SD-FMR pozwoliło na wyznaczenie parametru tłumienia. Zostały zdefiniowane i wyznaczone parametry efektywności spinowej Halla oraz absorpcji prądu spinowego. Pokazano, że struktura części buforowej próbki istotnie wpływa na wielkość analizowanych parametrów. Ta część rozprawy ma charakter raportu pomiarowego i nie zawiera głębszej dyskusji i interpretacji zaobserwowanych zależności.

Zawartość merytoryczna rozprawy doktorskiej stanowi znaczący wkład w rozwój nowej i intensywnie rozwijającej się dziedziny – spintroniki. Przedstawione wyniki są oryginalne i stanowią spójną, logiczną całość. Opisane badania poświęcone są strukturom warstwowym, których wspólną cechą są dwie składowe warstwy magnetyczne wykazujące wzajemne oddziaływanie w postaci sprzężenia międzywarstwowego. Ponadto pokazano możliwość inżynierii anizotropii magnetycznej, orientującej namagnesowanie w płaszczyźnie warstwy lub w kierunku do niej prostopadłym, poprzez dobór grubości warstwy i rodzaju okładek. Do uzyskania opisanych w rozprawie wyników konieczne było zastosowanie licznych technik badawczych, pozwalających na określenie struktury materiału, jego magnetycznych właściwości statycznych i dynamicznych, a także właściwości transportowych. Analizowane struktury można podzielić na dwie grupy pod względem rodzaju niemagnetycznej przekładki rozdzielającej składowe warstwy FM: złącza tunelowe z izolującą przekładką MgO oraz w pełni metaliczne, w których rolę separatora niemagnetycznego pełniły warstwy Pt i Ta – metali ciężkich wykazujących silny SOC. Pokazano, że w strukturach z tej drugiej grupy istnieje możliwość przełączania kierunku namagnesowania „górną-dół” w tzw. warstwie swobodnej za pomocą prądu ładunkowego w połączeniu z SOT przy braku zewnętrznego pola magnetycznego. W moim odczuciu jest to najciekawszy wynik opisany w rozprawie. Właściwość ta może znaleźć również zastosowanie praktyczne przy wytworzeniu nowoczesnych pamięci magnetycznych do zapisu danych.

Na podstawie informacji zawartych w rozprawie można stwierdzić, że doktorant był nie tylko współautorem tych prac, w których opublikowane wyniki są podstawą niniejszej rozprawy. Cztery wybrane artykuły zostały zamieszczone w dobrze notowanych i uznanych przez środowisko fizyczne czasopismach z listy JCR: *Journal of Applied Physics* (5-letni czynnik wpływu, ang.: *impact factor*, równy 2,71), *IEEE Transactions on Electron Devices* (3,207), *Physical Review Applied* (5,039), *Physical Review B* (3,808).

W dwóch ostatnich pracach doktorant jest pierwszym współautorem. Pozycja ta świadczy o jego wiodącej roli w przygotowaniu tych publikacji. Pozostałych 6 prac, których doktorant jest współautorem zostało zamieszczonych w czasopiśmie o podobnym poziomie cytowalności (*Applied Physics Letters, Scientific Reports, IEEE Transactions on Magnetics*). Wszystkie one są wieloautorskie, ale w przypadku szeroko zakrojonych badań właściwości fizycznych jest to standardem. Warto również podkreślić, że prace te wzbudziły duże zainteresowanie środowiska naukowego zajmującego się tą tematyką. Dwie z nich (w tym jedna doktorska) były cytowane ponad 20 razy, co stanowi bardzo dobry wynik dla tych 3-letnich prac.

Na wspomnienie zasługuje również organizacja rozprawy i jej strona edytorska. Bardzo przydatne i ułatwiające jej czytanie są listy zamieszczone w początkowej części rozprawy, w szczególności lista stosowanych w tekście skrótów. Wprowadzenie do badanych zjawisk fizycznych, stanowiące pierwszą część rozprawy, jest syntetyczne i może być przydatne dla jej czytelników. Tekst został starannie przygotowany i nie znalazłem w nim poważniejszych potknięć. Kilka drobnych nie rzutuje na dobrą ocenę pracy. Również forma graficzna z marginesem zawierającym uzupełniające informacje zasługuje na pozytywną uwagę.

Poniżej zamieściłem kilka uwag dotyczących rozprawy z jednoczesną prośbą do doktoranta o jego odniesienie się do wskazanych w czasie obrony rozprawy.

Str. 31: we wzorach (31) i (32) występuje wielkość  $M_{\text{eff}}$ . Nie podano jednak, jaki ma związek z  $M_s$  i anizotropią. W moim przekonaniu posługiwanie się parametrem  $M_{\text{eff}}$  nie jest naturalne (choć spotykane w książkach). Namagnesowanie nasycenia jest dobrze określonym i niemodyfikowanym parametrem. Efekty anizotropowe powinny być zawarte w polach efektywnych ( $H_{\text{eff}}$ ), jak to ma miejsce we wzorach (33) i (34).

Str.41: przydatna byłaby graficzna ilustracja struktury, podobnie jak ma to miejsce w przypadku innych próbek.

Str. 42: Wartość  $M_s$  podano w [T].

Str. 42: W jaki sposób została wyznaczona grubość warstwy nieaktywnej magnetycznie (ang.: *dead layer*)? Czy jest to wartość uśredniona dla obu interfejsów, czy też pojawia się ona na jednym z nich? Jeśli tak, to na którym? (**prośba o komentarz**).

Str. 43: Nie podano wyjaśnienia symbolu  $K_p$  w rozprawie i  $K_A$  w pracy [P7] (wyjaśnienie to jest jedynie w materiałach uzupełniających). Jaka została przyjęta konwencja znaków anizotropii (plus lub minus – dla osi łatwej lub łatwej płaszczyzny) w równaniach w rozprawie na stronie 43 i (2) w pracy [P7]? Wydaje się, że dla wartości  $K_A$  i  $K_{\text{eff}}$  w pracy [P7] jest ona sprzeczna (**prośba o komentarz**).

Praca [P4], Rys. 3d: zależność efektywnego kąta spinowego zjawiska Halla (czarne punkty) jest raczej słabo dopasowana do wyników symulacji (czerwona linia). Co może być tego przyczyną? W żadnym innym miejscu rozprawy nie znalazłem definicji kąta efektywnego. Czym się on różni od „zwykłego” kąta spinowego zjawiska Halla? (**prośba o komentarz**).

Struktury z przekładką Ta (praca [P7]), w zależności od jej grubości, wykazują sprzężenie ferromagnetyczne i antyferromagnetyczne. Autor rozprawy podaje prawdopodobny mechanizm przełączania kierunku namagnesowania bez pola magnetycznego, gdy warstwy są sprzężone ferromagnetycznie. W drugim przypadku nie zaobserwowano takiego zachowania i nie podano wyjaśnienia, dlaczego to przełączanie nie występuje. Czy można spodziewać się pewnej analogii do mechanizmu w złączach tunelowych, opisanych na stronie 34? **(prośba o komentarz)**.

W badanych strukturach warstwa FM występuje w asymetrycznym otoczeniu HM lub izolatora. W tego typu układach często pojawia się oddziaływanie Dzyaloshinskii-Moriya (DMI). Wpływa ono zarówno na strukturę domenową, jak i dynamikę namagnesowania. W rozprawie wspomina się o tym oddziaływaniu jedynie na stronie 38, w części opisującej zjawiska fizyczne. Nie odniesiono się do niego przy interpretacji wyników. Czy w badanych strukturach należy spodziewać się DMI, a jeśli tak, to jaki może mieć ono wpływ na dyskutowane w rozprawie wyniki? **(prośba o komentarz)**.

Powyższe niedociągnięcia i niejasności nie mają jednak istotnego wpływu na zawartość merytoryczną rozprawy, którą uważam za wartościową. Jak już wspomniałem, merytoryczna część rozprawy oparta jest na czterech pracach opublikowanych w uznanych czasopismach naukowych. Prezentowane wyniki zostały zatem już wcześniej pozytywnie ocenione przez recenzentów. Innym dowodem ich jakości jest dość duża cytowalność prac, w których je opisano.

Rozprawa doktorska mgra inż. Stanisława Marka Łazarskiego pt.: *Dynamika i przełączanie magnetyzacji indukowane prądami spinowymi w heterostrukturach metal ciężki/ferromagnetyk* spełnia również wszystkie wymogi formalne, zapisane w Ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z 20 lipca 2018 r., które uzasadniłem powyżej.

**Na podstawie oceny zawartości przedstawionej rozprawy wnioskuję o dopuszczenie mgra inż. Stanisława Łazarskiego do kolejnych etapów przewodu doktorskiego, realizowanego w dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Sugeruję również rozważenie nadania wyróżnienia tej pracy. Argumentami uzasadniającymi to wyróżnienie są: bardzo aktualna tematyka pracy, zawierająca aspekt poznawczy i aplikacyjny, ciekawe wyniki opublikowane w renomowanych czasopismach z listy JCR, pierwsza pozycja doktoranta w dwóch pracach, pozytywne przyjęcie prac wyrażone w wysokiej cytowalności jednej z nich oraz staranna strona edytorska rozprawy.**