

Prof. dr hab. inż. Regina Paszkiewicz
Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów
Politechnika Wrocławska
50-370 Wrocław
ul. Janiszewskiego 11/17

Wrocław, 9.09.2022

SEKRETARIAT
Rady Dyscypliny AEE

14. 09. 2022

Wpłynęło dnia
Zarejestrowano pod nr
Podpis *Jan*

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Stanisława Marka Łazarskiego pt.: „Dynamika i przełączanie magnetyzacji indukowane prądami spinowymi w heterostrukturach metal ciężki/ferromagnetyk”, wykonana dla Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika Akademii Górniczo-Hutniczej im. S. Staszica na podstawie uchwały w wym. Rady i pisma Przewodniczącego Rady Dyscypliny AEE Akademii Górniczo-Hutniczej, dra hab. inż. Ryszarda Sroki, prof. uczelni z dnia 8.07.2022r.

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Witold Skowroński, prof. AGH

Elektronika spinowa zwana też spintroniką jest jedną z dynamicznie rozwijających się dziedzin nanoelektroniki ponieważ umożliwia wytwarzanie urządzeń nowej generacji, bazujących na wykorzystaniu spinu elektronu, którego kierunek można kontrolować przy pomocy pola elektrycznego lub prądów spinowych, bez udziału zewnętrznego pola magnetycznego co pozwala np. na zmniejszenie poboru mocy przez elementy elektroniczne. Jednym z kluczowych zagadnień spintroniki jest zbadanie efektu przełączania namagnesowania bez udziału zewnętrznego pola magnetycznego oraz zrozumienie jego dynamiki w nanoskali aby możliwe było wykorzystanie tego efektu w zastosowaniach praktycznych np. w pamięciach.

Z tego względu praca mgr inż. Stanisława Marka Łazarskiego dobrze wpisuje się w tematykę badań prowadzonych w wiodących ośrodkach krajowych i zagranicznych ponieważ prowadzone przez niego badania miały na celu eksperymentalne zbadanie dynamiki namagnesowania w cienkowarstwowych heterostrukturach na bazie metale ciężkich, które wykazują duże sprzężenie spin-orbita w oddziaływaniu z ferromagnetykami.

Praca ma charakter doświadczalno-teoretyczny. Szczegółowe cele rozprawy zostały sformułowane przez je Autora w sposób prawidłowy. Praca ma duży element nowości, a jej tematyka jest aktualna i ważna dla rozwoju badań związanych z nowymi materiałami do zastosowań w spintronice.

W oparciu o pogłębioną analizę danych literaturowych Autor zaplanował metodykę i zakres prac badawczych. W rozprawie mgr inż. Stanisław Łazarski cytuje 148 prace źródłowe oraz 4, których jest głównym autorem lub współautorem. Wnioski z ich analizy sformułowano w sposób prawidłowy, świadczący o dobrej znajomości problematyki rozprawy.

Przedstawiona do recenzji rozprawa, liczy 77 stron, i została napisana w języku angielskim. Składa się ona z wprowadzenie, opisu teorii dynamiki i własności magnetotransportowych zaawansowanych ukła-

dów cienkowarstwowych. W kolejnej części pracy omówiono podstawowe właściwości cienkich warstw magnetycznych takich jak anizotropia magnetyczna, wymienne sprzężenie między warstwowe, transfer spinowego momentu siły, spinowo-orbitalny moment siły oraz magnetorezystancja. W dalszej części pracy przedstawiono zjawiska ważne z punktu widzenia zrealizowanych badań takie jak spinowy efekt Halla czy przełączanie magnetyzacji. Przedstawiono również ważne w pomiarach dynamicznych układów wielowarstwowych zależności takie jak równania Kittel'a oraz równanie Landau–Lifshitz–Gilbert uzupełnione o transfer spinowego momentu siły Slonczewskiego. W kolejnej części pracy zaprezentowano zaplanowane, na podstawie pogłębionej analizy danych literaturowych, własne eksperymenty autora rozprawy, które miały na celu zbadanie zachowania dynamiki różnych układów testowych na bazie magnetycznych złącz tunelowych lub ich elementów. W ostatniej części pracy doktorskiej zbadano również układy o mieszanych anizotropiach magnetycznych, które wykazują zdolność do przełączania swojego namagnesowania bez obecności zewnętrznego pola magnetycznego, co jest niezwykle istotne z punktu widzenia ich potencjalnych aplikacji do zapisu informacji przy zastosowaniu namagnesowania. Rozdział obejmujący oryginalne prace eksperymentalne Autora rozprawy bazuje na czterech artykułach, które zostały opublikowane w czasopiśmie indeksowanym w WoS z listy JCR o dużym współczynniku oddziaływania:

- [P1] W. Skowroński, S. Łazarski, P. Rzeszut, S. Ziętek, J. Chęciński and J. Wrona, Influence of a composite free layer structure on thermal stability of perpendicular magnetic tunnel junction, *Journal of Applied Physics* 124, 063903 (2018). DOI: doi.org/10.1063/1.5032148,
- [P4] S. Łazarski, W. Skowroński, J. Kanak, Ł. Karwacki, S. Ziętek, K. Grochot, T. Stobiecki and F. Stobiecki, Field-Free Spin-Orbit Torque Switching in Co/Pt/Co Multilayer with Mixed Magnetic Anisotropies, *Physical Review Applied* 12, 014006 (2019). DOI: 10.1103/PhysRevApplied.12.014006,
- [P7] S. Łazarski, W. Skowroński, K. Grochot, W. Powroźnik, J. Kanak, M. Schmidt and T. Stobiecki, Spin-orbit torque induced magnetization dynamics and switching in CoFeB/Ta/CoFeB system with mixed magnetic anisotropy, *Physical Review B* 103, 134421 (2021). DOI: 10.1103/PhysRevB.103.134421,
- [P9] W. Skowroński, K. Grochot, P. Rzeszut, S. Łazarski, G. Gajoch, C. Worek, J. Kanak, T. Stobiecki, J. Langer, B. Ocker, M. Vafae, Angular Harmonic Hall Voltage and Magnetoresistance Measurements of Pt/FeCoB and Pt-Ti/FeCoB Bilayers for Spin Hall Conductivity Determination, *IEEE Transactions on Electron Devices* 68, no. 12, p. 6379-5385 (2021). DOI: 10.1109/TED.2021.3122999.

Dwie z tych prac zostały dołączone w całości [P4, P7] a dwie pozostałe [P1, P9] Autor przeredagował w celu podkreślenia danych uzyskanych przez niego. Wnioski z przeprowadzonych badań Autor rozprawy, mgr inż. Stanisław Łazarski, zawarł w podsumowaniu, w którym przedstawił wizję dalszego rozwoju spintroniki. W rozdziale tym określony został również oryginalny wkład Autora rozprawy problematykę badań. Ostatnią częścią jest rozprawy jest dodatek, w którym przedstawiono szczegółowe porównanie między dwoma układami pomiarowymi SD-FMR (Spin Diode Ferromagnetic Resonance - metoda rezonansu ferromagnetycznego diody spinowej) opisano wpływ temperatury na anizotropię materiału oraz zawar-

to szczegółowy opis procesu nanolitografii badanych układów testowych. W bibliografii uwzględniono łącznie prawie 148 dobrze prawidłowo dobranych i aktualnych pozycji literaturowych.

Autor opublikowała łącznie 9 artykułów poświęconych problematyce rozprawy, jeden artykuł został przyjęty do druku. Są to wszystko prace wieloautorskie, co wynika ze złożonego charakteru prowadzonych badań zawierających nie tylko rozważania teoretyczne, pomiary ale również wytwarzanie specjalizowanych struktur testowych.

Mgr inż. Stanisław Łazarski do weryfikacji sformułowanych hipotez badawczych wybrał właściwy i adekwatny zestaw metod badawczych obejmujących realizację eksperymentów osadzania, strukturyzacji oraz analizę wytworzonych układów wielowarstwowych i struktur testowych techniką rezonansu ferromagnetycznego przy użyciu wektorowego analizatora sieci, technikę dyfrakcji rentgenowskiej (XRD), pomiar odbicia promieniowania rentgenowskiego oraz metodę magnetometrii wibracyjnej. Metody te nie wymagają wytwarzania specjalizowanych testowych struktur przyrządowych i umożliwią pomiar niektórych własności statycznych i dynamicznych układów wielowarstwowych w celu określenia np. stałej tłumienia, anizotropii lub sprzężenia wymiany międzywarstwowej w układach wielowarstwowych. Autor również zaprojektował specjalizowane testowe struktur przyrządowe, które wytworzył przy użyciu klasycznych metod mikro- i nano-elektronicznych, do pomiarów metodą rezonansu ferromagnetycznego diody spinowej, pomiarów harmonicznego napięcia Halla oraz pomiarów przełączania magnetyzacji indukowanej prądem spinowo spolaryzowanym. Metody te pozwalają na pogłębiony opis parametrów magnetycznych i elektrycznych układów wielowarstwowych. Ponadto przy ich użyciu można określić, istotne z punktu widzenia potencjalnych zastosowań, właściwości heterostruktur metal ciężki/ferroelektryk, takie jak efektywny kąt Hall'a, określający procentową konwersję prądu ładunkowego na prąd spinowy, oraz prąd krytyczny przełączania w obecności lub bez obecności zewnętrznego pola magnetycznego. Zastosowanie tych metod pozwoliło na eksperymentalne zbadanie dynamiki namagnesowania w cienkowarstwowych heterostrukturach spintronicznych wykorzystujących metale ciężkie, które wykazują duże sprzężenie spin-orbita w oddziaływaniu z ferromagnetykami. Badano układy wielowarstwowe: Co/FeB/W/CoFeB/MgO, Co/Pt/Co, CoFeB/Ta/CoFeB, Ta/Pt/Fe₆₀Co₂₀B₂₀/Ta, Ta/PtTi/Pt/Fe₆₀Co₂₀B₂₀/Ta o różnej grubości poszczególnych warstw.

Praca jest oryginalna, a prezentowane wyniki badań stanowią samodzielny i oryginalny dorobek mgr inż. Stanisława Łazarskiego.

Do najważniejszych osiągnięć Autora można zaliczyć:

- badania magnetycznych warstw sprzężonych, z mieszaną anizotropią magnetyczną, w której przedkładka sprzęgająca (Pt lub Ta) jest jednocześnie źródłem prądów spinowych, które w pewnych warunkach indukują dynamikę magnetyzacji oraz jej przełączenie bez udziału zewnętrznego pola ma-

gnetycznego,

- stwierdzenie, że konieczne są dalsze badania nad miniaturyzacją elementów spintronicznych w skali nm, które wpłyną na zmniejszenie czasu i prądu przełączania, co pozwoli na zastosowanie tych układów w rzeczywistych urządzeniach pamięci o dużej gęstości,
- zbadanie dynamiki magnetycznych złącz tunelowych,
- zbadania spinowego momentu siły pochodzącego od materiałów ze sprzężeniem spin orbita w układzie dwuwarstwowym HM/FM (ciężki metal/ferromagnetyk),
- eksperymentalne potwierdzenie roli platyny w konstrukcji elementów spintonicznych.

Autor wykazał się umiejętnością poprawnego i przekonującego przedstawienia prac eksperymentalnych i wyników pomiarów oraz prawidłowej analizy rezultatów przeprowadzonych badań. Praca ma prawidłowy układ. Od strony edytorskiej jej jakość nie budzi zastrzeżeń poza brakiem numeracji zamieszczonych w bibliografii pozycji literaturowych, co znacząco utrudniło recenzentowi czytanie rozprawy. Nie wpłynęło to na ogólnie pozytywną ocenę strony edytorskiej rozprawy przez Recenzenta.

Recenzentowi zabrakło w rozprawie wyjaśnienia wpływu technologii na badane parametry heterostruktur metal ciężki/ferromagnetyk oraz próby oceny koniecznego skalowania wymiarów warstw i struktur, aby możliwe było praktyczne wykorzystanie tego typu struktur w różnych aplikacjach, nie tylko w pamięciach. Nie podano również jaka była powtarzalność składu i grubości osadzanych warstw. Pewne zastrzeżenia Recenzenta budzi też dość ogólne sformułowanie problemu badawczego, który Autor określił jako zrozumienie mechanizmu przełączania namagnesowania bez udziału zewnętrznego pola magnetycznego oraz zbadanie dynamiki zaprojektowanych i wytworzonych układów spintronicznych. W rozprawie brak również wyjaśnienia wyboru składu badanych układów materiałowych.

Nie stwierdzam, poza sformułowanymi wyżej uwagami, występowania innych, istotnych uchybień i słabych stron prezentowanej rozprawy.

Nie mają one jednak wpływu na ogólnie pozytywną ocenę rozprawy i pozwala stwierdzić, że postawiony przez Autora cel badań został osiągnięty a przedstawiona do recenzji rozprawa zawiera oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

Recenzent stwierdza, że rozprawa mgr inż. Stanisława Łazarskiego stanowi oryginalny i samodzielny dorobek Autora oraz spełnia z nadmiarem wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy.

Biorąc pod uwagę dorobek naukowy mgr inż. Stanisława Łazarskiego i pozytywną ocenę Jego pracy doktorskiej uważam, że w myśl ustawy z 20 lipca 2018 r (Dz. U. Nr Dz.U.2022.574, z późn. zm.) Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, mgr inż. Stanisława Łazarskiego spełnia wymagania stawiane kandyda-

tom do stopnia naukowego doktora w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika oraz wnioskuję o dopuszczenie go do publicznej obrony przedstawionej pracy.

R. Pentecost

