

Warszawa 24.10.2022

prof. dr hab. Maciej Bugajski
Sieć Badawcza Łukasiewicz
Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki
Al. Lotników 32/46
02 668 Warszawa

S E K R E T A R I A T
Rady Dyscypliny AEETK
Wpłynęło dnia..... 16. 11. 2022
Zarejestrowano pod nr
Podpis

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Stanisława Łazarskiego pt.

"Dynamika i przełączanie magnetyzacji indukowane prądami spinowymi w heterostrukturach metal ciężki/ferromagnetyk"

Praca mgr inż. Stanisława Łazarskiego poświęcona jest zbadaniu mechanizmów przełączania magnetyzacji indukowanego prądami spinowymi w cienkowarstwowych heterostrukturach spintronicznych wykorzystujących metale ciężkie, które charakteryzują się znacznym sprzężeniem spin-orbita w oddziaływaniu z ferromagnetykami. Zagadnienia te są przedmiotem badań w wielu laboratoriach na świecie. Wiąże się to z potencjalnymi zastosowaniami spintroniki w elektronice nowej generacji. Praca ma charakter eksperymentalny z silną podbudową teoretyczną. Zastosowane techniki pomiarowe; technika rezonansu ferromagnetycznego przy użyciu wektorowego analizatora sieci (VNA-FMR) i metoda rezonansu ferromagnetycznego diody spinowej (SD-FMR) umożliwiają opis parametrów magnetycznych i elektrycznych układów wielowarstwowych istotnych z punktu widzenia zastosowań. Tematyka pracy jest aktualna i ważna z naukowego i praktycznego punktu widzenia.

Rozprawa doktorska została napisana w języku angielskim. Zawiera wprowadzenie, pięć rozdziałów poświęconych teorii własności magnetotransportowych układów cienkowarstwowych, obszerny rozdział poświęcony omówieniu wyników własnych, podsumowanie, dodatek aparaturowy, w którym zawarte zostały szczegóły procesu litografii układów i spis literatury. Rozprawa oparta jest na 4 artykułach opublikowanych w latach 2018-2021 w prestiżowych czasopismach z dziedziny fizyki półprzewodników i przyrządów półprzewodnikowych.

[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).

[P4] S. Łazarski, W. Skowroński, J. Kanak, Ł. Karwacki, S. Ziętek, K. Grochot, T. Stobiecki, F. Stobiecki, **Field-Free Spin-Orbit Torque Switching in Co/Pt/Co Multilayer with Mixed Magnetic Anisotropies**, Physical Review Applied **12**, 014006 (2019).

[P7] S. Łazarski, W. Skowroński, K. Grochot, W. Powroźnik, J. Kanak, M. Schmidt, T. Stobiecki, **Spin-orbit torque induced magnetisation dynamics and switching in CoFeB/Ta/CoFeB system with mixed magnetic anisotropy**, Physical Review B **103**, 134421 (2021).

[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).

Dwie z wymienionych prac, w których doktorant jest pierwszym autorem zostały włączone do rozprawy w całości, natomiast dwie pozostałe zostały przeredagowane przez autora tak by pokazywały dane uzyskane przez niego.

Rozdziały 2 do 6 (str.18 do str.40) przedstawiają podstawowe pojęcia niezbędne do zrozumienia funkcjonowania wielowarstwowych układów spintronicznych, takie jak magnetyczne złącza tunelowe i zawory spinowe, anizotropia magnetyczna, wymienne sprzężenie międzywarstwowe, transfer spinowego momentu siły, magnetorezystancja i zjawiska Halla. Zostały też opisane wykorzystywane w pomiarach dynamicznych zagadnienia dotyczące transferu spinowego momentu siły. Ta część pracy została przygotowana bardzo starannie i świadczy o bardzo dobrej znajomości podstaw teoretycznych dziedziny badań.

Kolejny rozdział liczący 27 stron zawiera oryginalne wyniki autora. Omówiono w nim szereg eksperymentów, które pozwoliły na zbadanie mechanizmów przełączania magnetyzacji w różnorodnych układach opartych na magnetycznych złączach tunelowych.

Na wstępie, w oparciu o pracę [P1] omówiona została technika i wyniki badań nad układami cienkowarstwowymi za pomocą rezonansu ferromagnetycznego przy użyciu wektorowego analizatora sieci (VNA-FMR). Technika ta nie wymaga nanostrukturyzacji próbek za pomocą procesu litografii, co znacznie upraszcza pomiary i pozwala na relatywnie szybki wgląd w niektóre własności statyczne i dynamiczne układów wielowarstwowych takie jak stała tłumienia, anizotropia lub sprzężenie wymiany międzywarstwowej. Głównym zagadnieniem badanym w pracy [P1] był wpływ warstwowej struktury na stabilność termiczną magnetycznego złącza tunelowego (pMTJ). Badano dwa rodzaje struktur ze zmieniającą się grubością warstwy ferromagnetycznej CoFeB i warstwy przykrywkowej MgO. Zaobserwowano indukowane prądem przełączanie magnetyzacji. Zmiany grubości warstwy ferromagnetycznej i warstwy MgO pozwalały na modyfikację energii progowej prostopadłej magnetycznej anizotropii złącza (PMA). Efekt ten miał jednak ograniczenia wynikające z pojawiania się dla pewnych kombinacji grubości warstw struktury dodatkowej pasożytniczej szeregowej rezystancji.

Przeprowadzenie badań opisanych w pracach [P4,P7] wymagało wytworzenia układów planarnych wraz z odpowiednim systemem elektrod. W tym celu wykorzystano techniki litografii optycznej i nanostrukturyzację za pomocą elektronolitografii. Umożliwiło to pełniejszy opis parametrów magnetycznych i elektrycznych układów wielowarstwowych

pozwalając na określenie kluczowych z punktu widzenia zastosowań własności, takich jak efektywny kąt Hall-a, który mówi o procentowej konwersji prądu ładunkowego na prąd spinowy, czy też prąd krytyczny przełączania w obecności lub bez zewnętrznego pola magnetycznego. W wymienionych pracach badano układy o mieszanych anizotropiach magnetycznych, które wykazują zdolność do przełączania swojego namagnesowania bez obecności zewnętrznego pola magnetycznego, co jest niezwykle istotne w przypadku zastosowań podobnych układów do zapisu informacji w postaci namagnesowania w nowoczesnych układach spintronicznych.

Badania magnetycznych warstw sprzężonych z mieszaną anizotropią magnetyczną, w której przekładka sprzęgająca (Pt lub Ta) jest jednocześnie źródłem prądów spinowych, które indukują dynamikę magnetyzacji oraz jej przełączenie w pewnych warunkach bez udziału zewnętrznego pola magnetycznego (praca [P4] - Physical Review Applied **12**, 014006 (2019)) należy zaliczyć do najważniejszych rezultatów rozprawy doktorskiej. Praca [P4] została dostrzeżona przez międzynarodowe środowisko naukowe i doczekała się już 30 cytowań.

Rozprawę uzupełniają badania dynamiki w magnetycznych złączach tunelowych oraz badania spinowego momentu siły pochodzącego od materiałów ze sprzężeniem spin-orbita. Praca [P4] analizuje pomiary Hall-a zależnych od spinu zjawisk w strukturach ciężki metal/ferromagnetyk. Badania opisane w pracy [P4] potwierdzają atrakcyjność platyny (Pt) jako materiału spintronicznego.

Rozprawę doktorską zamykają dodatki. Pierwszy poświęcony jest technice pomiarowej rezonansu ferromagnetycznego diody spinowej (SD-FMR), drugi omawia techniki nanostrukturyzacji i wytwarzania struktur przyrzadowych; elektronolitografię, trawienie jonowe i sputtering magnetronowy. Dla wytwarzania struktur przyrzadowych doktorant korzystał z clean-room-u Akademickiego Centrum Materiałów i Nanotechnologii AGH.

WNIOSKI KOŃCOWE

Rozprawa doktorska mgr inż. Stanisława Łazarskiego dowodzi, że opanował on w stopniu bardzo dobrym techniki skomplikowanych pomiarów magneto-transportowych oraz metody analizy własności układów cienkowarstwowych przy pomocy różnych modeli makrospinowych i rozwinął możliwości technologiczne mikro- i nano-fabrykacji prototypowych urządzeń przy pomocy metod litografii optycznej i elektronowej. Prototypowe układy, którymi się zajmował zostały przez niego kompleksowo zbadane i przeanalizowane pod kątem przydatności do zapisu informacji w postaci namagnesowania w nowoczesnych układach spintronicznych. Wnioski formułowane przez doktoranta oparte są na dobrze zaplanowanych eksperymentach i głębokim zrozumieniu mechanizmów fizycznych leżących u podstaw obserwowanych zjawisk.

Praca jest zredagowana poprawnie i napisana w sposób jasny i przejrzysty. Zwraca uwagę staranna szata graficzna i poziom edytorski pracy. Pracę uważam za bardzo dobrą, pozbawioną istotnych wad. Najważniejszym z naukowego i praktycznego punktu widzenia

osiągnięciem pracy jest szczegółowa analiza układów o mieszanych anizotropiach magnetycznych, które wykazują zdolność do przełączania swojego namagnesowania bez obecności zewnętrznego pola magnetycznego.

Recenzowana praca stanowi samodzielny i oryginalny dorobek naukowy autora, potwierdzony publikacjami w najlepszych czasopismach z dziedziny fizyki półprzewodników i przyrządów półprzewodnikowych. Rozprawa oparta jest na 4 artykułach opublikowanych w latach 2018-2021. Łącznie doktorant jest autorem 10 prac opublikowanych w Physical Review Applied (3), Physical Review B (2), Scientific Reports (1), Journal of Applied Physics (1), Applied Physics Letters (1), IEEE Transactions on Electron Devices (1) i IEEE Transactions on Magnetism (1).

Stwierdzam, że rozprawa doktorska "Dynamika i przełączanie magnetyzacji indukowane prądami spinowymi w heterostrukturach metal ciężki/ferromagnetyk" mgr inż. Stanisława Łazarskiego spełnia wymagania związane z uzyskaniem stopnia doktora, określone w Art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. W związku z tym wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Stanisława Łazarskiego do dalszego postępowania w celu nadania stopnia doktora nauk technicznych w dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika.

Jednocześnie uważam, że praca mgr inż. Stanisława Łazarskiego stanowi znaczący wkład w poziom wiedzy w zakresie spintroniki i przyczynia się do głębszego zrozumienia procesów fizycznych zachodzących w urządzeniach elektroniki spinowej do zastosowań w energooszczędnych pamięciach magnetycznych swobodnego dostępu i komponentach mikrofalowych. W szczególności dotyczy to magnetycznych warstw sprzężonych z mieszaną anizotropią magnetyczną, w której przekładka sprzęgająca (Pt lub Ta) jest jednocześnie źródłem prądów spinowych, które indukują dynamikę magnetyzacji oraz jej przełączanie bez udziału zewnętrznego pola magnetycznego. Oryginalne osiągnięcia doktoranta zostały potwierdzone dwoma artykułami w Physical Review, których jest pierwszym autorem. Na tej podstawie wnioskuję o wyróżnienie pracy.

