

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

Wrocław, 2.05.2022

S E K R E T A R I A T
Rady Dyscypliny AEE

Wpłynęło dnia10.05.2022....
Zarejestrowano pod nr
Podpis
k-elekt. gn

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Moniki Joanny Cecot „Elementy elektroniki spinowej: magnetyczne złącza tunelowe oraz heterostruktury spinowego efektu Halla 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 8.04.2022r.

Promotor rozprawy: prof. dr hab. Tomasz Stobiecki
Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Witold Skowroński

Recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Moniki Cecot „Elementy elektroniki spinowej: magnetyczne złącza tunelowe oraz heterostruktury spinowego efektu Halla metal ciężki – ferromagnetyk” poświęcona jest problematyce wytwarzania i zbadania wybranych elementów elektroniki spinowej w postaci magnetycznego złącza tunelowego (MTJ) i heterostruktury spinowego efektu Halla (SHE) do zastosowań w nanoelektronice, w tym w magnetycznych pamięciach o dostępie swobodnym (Magnetoresistive Random Access Memory - MRAM). Rozprawa została przygotowana na bazie czterech artykułów współautorskich, które zostały opublikowane w czasopiśmie indeksowanym w WoS z listy JCR. Dwie z tych publikacji dotyczą magnetycznych złącz tunelowych:

- [P1] M. Cecot, J. Wrona, J. Kanak, S. Ziętek, W. Skowroński, A. Żywczak, M. Czapkiewicz, T. Stobiecki, “Magnetic properties and magnetization dynamics of magnetic tunnel junction bottom electrode with different buffer layers”, IEEE Transactions on Magnetism, vol. 51, no. 11, pp. 1–4, 2015, DOI: 10.1109/TMAG.2015.2440561
- [P2] M. Frankowski, A. Żywczak, M. Czapkiewicz, S. Ziętek, J. Kanak, M. Banasik, W. Powroźnik, W. Skowroński, J. Chęciński, J. Wrona et al., „Buffer influence on magnetic dead layer, critical current, and thermal stability in magnetic tunnel junctions with perpendicular magnetic anisotropy”, Journal of Applied Physics, vol. 117, no. 22, p. 223, 908, 2015, DOI: 10.1063/1.4922499

a dwie kolejne dotyczą heterostruktur spinowego efektu Halla:

- [P3] W. Skowroński, M. Cecot, J. Kanak, S. Ziętek, T. Stobiecki, L. Yao, S. Van Dijken, T. Nozaki, K. Yakushiji and S. Yuasa, “Temperature dependence of spin-orbit torques in W/CoFeB bilayers”, *Applied Physics Letters*, vol. 109, no. 6, p. 062 407, 2016, DOI: 10.1063/1.4960793
- [P4] M. Cecot, Ł. Karwacki, W. Skowroński, J. Kanak, J. Wrona, A. Żywczak, L. Yao, S. van Dijken, J. Barnas, T. Stobiecki, „Influence of intermixing at the Ta/CoFeB interface on spin Hall angle in Ta/CoFeB/MgO heterostructures” , *Scientific reports*, 7(1), 1-11, 2017, DOI: 10.1038/s41598-017-00994-z.

Do dokumentacji dołączono oświadczenia mgr inż. Moniki Cecot, określające jej procentowy udział w każdej z tych prac oraz wskazanie na czym udział ten polegał. Każda dołączona do rozprawy publikacja została poprzedzona teoretycznym wprowadzeniem w jej problematykę.

W załączniku przedstawiono kolejną publikację, która ukazała się w recenzowanych materiałach międzynarodowej konferencji naukowej: [Z1] S. Ziętek, M. Cecot, W. Skowroński, T. Stobiecki, „Magnetization dynamics of NiFe film and anisotropic magnetoresistance device: Comparison of microwave detection methods”, 21st International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications, (MIKON), IEEE, pp. 1–4, 2016, DOI: 10.1109/MIKON.2016.7492130.

Celem rozprawy była realizacja badań magnetycznych złącz tunelowych i heterostruktur spinowego efektu Halla, przeznaczonych do zastosowań w pamięciach magnetycznych. Badania te koncentrowały się na: określeniu wpływu warstw buforowych, oddzielających podłoża od warstw aktywnych magnetycznie, na parametry magnetyczne i strukturalne warstw złącza tunelowego, wyznaczeniu zależności temperaturowych spinowego kąta Halla oraz ocenie wpływu wymieszania na interfejsie warstw metal ciężki/ferromagnetyk na działanie elementów. Uważam, że na bazie dotychczasowego stanu wiedzy na temat technologii i działania elementów elektroniki spinowej problemy badawcze przedstawione w rozprawie zostały sformułowane poprawnie.

Rozprawa ma charakter doświadczalno – teoretyczny. Ma ona duży element nowości, a jej tematyka jest aktualna i ważna dla badań stosowanych w obszarze spintroniki.

Przedstawiona do recenzji rozprawa liczy 73 strony i składa się ze: spisu treści, streszczenia w języku polskim i angielskim, spisu publikacji, które zostały umieszczone w pracy, spisu skrótów, wprowadzenia, trzech rozdziałów, podsumowania, jednego załącznika w postaci artykułu [Z1] oraz bibliografii liczącej 68 pozycji. Wnioski z analizy danych źródłowych sformułowano w sposób prawidłowy świadczący o dobrej znajomości i zrozumieniu tematyki

rozprawy. Merytorycznie rozprawa podzielona jest na dwie części. W części pierwszej, dotyczącej magnetycznych złącz tunelowych (MTJ), mgr inż. Monika Cetot przedstawiła wyniki badań wpływu różnych warstw buforowych (warstw oddzielających podłoże od warstw aktywnych magnetycznie) takich jak Ta, Ta/CuN/Ta, oraz Ta/Ru/Ta, na parametry magnetyczne dolnej elektrody magnetycznego na bazie $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$, magnetycznego złącz tunelowego oraz na kompletne złącze $\text{Fe}_{60}\text{Co}_{20}\text{B}_{20}/\text{MgO}/\text{Fe}_{60}\text{Co}_{20}\text{B}_{20}$.

W drugiej części rozprawy mgr inż. Monika Cetot przedstawiła wyniki badań temperaturowych spinowego efektu Halla w heterostrukturach wytwarzanych w układach W/ $\text{Co}_{12}\text{Fe}_{68}\text{B}_{20}$ i Ta/ $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$ o różnych grubościach metali ciężkich (W i Ta).

Rozdział pierwszy stanowi wprowadzenie do rozprawy. Liczy on 3 strony. Autorka przedstawiła w nim motywację prowadzenia badań nad elementami elektroniki spinowej, zaprezentowała cel swojej rozprawy oraz opisała, w sposób syntetyczny, jej zawartość.

W rozdziale drugim, liczącym 10 stron, mgr inż. Monika Cetot przedstawiła opis zastosowanych metod eksperymentalnych. Zaprezentowała metody wytwarzania badanych warstw i układów magnetycznych oraz metody ich charakteryzacji strukturalnej techniką dyfrakcji rentgenowskiej, mikroskopii sił atomowych i transmisyjnej mikroskopii elektronowej. Warstwy magnetyczne i układy wielowarstwowe magnetycznych złącz tunelowych były nanoszone metodą rozpylania jonowego techniką katodowego rozpylania jonowego w laboratorium firmy Singulus Technologies AG na termicznie utlenionym podłożu krzemowym. Układy do badań spinowego efektu Halla były wytwarzane techniką katodowego rozpylania jonowego w National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tsukuba, w Japonii.

W dalszej części rozdziału Autorka rozprawy omówiła stosowane metody pomiarów magnetometrycznych przy użyciu magnetometru wibracyjnego i magnetoptycznego mikroskopu Kerra oraz sposoby detekcji dynamiki namagnesowania i wyznaczenia tłumienia precesji przy użyciu technik mikrofalowych: szerokopasmowego rezonansu mikrofalowego (scalar network analysis ferromagnetic resonance - SNA-FMR), oraz pomiaru indukowanych impulsem sygnałów gasnących (pulse inductive microwave magnetometry - PIMM). Ostatnia część rozdziału poświęcona jest opisowi nanostrukturyzacji układów do badań spinowego efektu Halla oraz magnetycznych złącz tunelowych techniką elektronolitografii, trawienia jonowego oraz nanoszenia cienkich warstw metalicznych (Al, Au, Cr, Pt, Ta) i dielektrycznych (Ta_2O_5 , Al_2O_3).

W rozdziale 3, liczącym 21 stron, mgr inż. Monika Cetot przedstawiła parametry magnetycznych złącz tunelowych (MTJ) jako podstawowych komórek pamięci oraz omówiła wyniki swoich prac nad wpływem warstw buforowych na parametry warstwy ferromagnetycznej

tworzącej MTJ (publikacje [P1] i [P2]) oraz ich wpływ na złącze MTJ (publikacja [P2]). Ostatnią część rozdziału 3 stanowi podrozdział, w którym Autorka rozprawy podsumowała rezultaty badań magnetycznych złącz tunelowych szczegółowo zaprezentowane w pracy [P1] i [P2].

Rozdział 4, liczący 25 stron, zawiera wyniki badań spinowego efektu Halla w układach ciężki metal/ferromagnetyk/MgO zawartych w publikacjach [P3] i [P4] dotyczących układów W/Co₁₂Fe₆₈B₂₀/MgO i Ta/Co₄₀Fe₄₀B₂₀/MgO. W ostatniej części rozdziału 4 mgr inż. Monika Cetot podsumowała rezultaty temperaturowych pomiarów harmonicznych napięć Halla badanych układów materiałowych, o różnych grubościach metali ciężkich co zostało szczegółowo omówione w pracy [P3] i [P4].

W posumowaniu stanowiącym rozdział 5 Autorka rozprawy, w sposób syntetyczny, przedstawiła najważniejsze rezultaty swoich badań. Do pracy dołączyła również załącznik (rozdział 6), który stanowi artykuł [Z1], poświęcony badaniu dynamiki magnetyzacji w warstwach NiFe przy użyciu eksperymentalnych technik mikrofalowych. Artykuł ten został opublikowany w materiałach 21 międzynarodowej konferencji mikrofalowej, radarowej i łączności bezprzewodowej (MIKON2016),

Zdaniem recenzenta na podkreślenie zasługuje umiejętne posługiwanie się przez mgr inż. Monikę Cetot danymi literaturowymi do planowania realizowanych badań oraz oceny ich rezultatów. Autorka rozprawy przyjęła zasadne i prawidłowe założenia badawcze, a do ich udowodnienia wybrała właściwy zestaw metod. Ich świadome zastosowanie pozwoliło na osiągnięcie zamierzonego celu badań.

Rozprawa jest oryginalna, a prezentowane wyniki badań stanowią samodzielny dorobek mgr inż. Moniki Cetot.

Do najważniejszych osiągnięć Autorki rozprawy należą:

w części dotyczącej MTJ (prace [P1] i [P2]):

- zbadanie wpływu różnych warstw buforowych takich jak: Ta, Ta/CuN/Ta, oraz Ta/Ru/Ta na parametry magnetyczne dolnej elektrody Co₄₀Fe₄₀B₂₀ MTJ oraz na parametry kompletnego złącze Fe₆₀Co₂₀B₂₀/MgO/Fe₆₀Co₂₀B₂₀,
- wykazanie, że złącze z anizotropią prostopadłą, wytworzone na buforze Ta(5 nm)/Ru(10 nm)/Ta(3 nm) o mniejszej szorstkości i słabszej teksturze, miało dużą stabilność termiczną i mały prąd przełączania stanów bitowych

w części dotyczącej heterostruktur SHE (prace [P3] i [P4]):

- wykazanie, że w układach W/Co₁₂Fe₆₈B₂₀ i Ta/Co₄₀Fe₄₀B₂₀, o zmiennej grubości warstw W i Ta, występuje dyfuzyjne wymieszanie na interfejsie metal ciężki (W, Ta) z warstwą

ferromagnetyka CoFeB,

- przeanalizowanie zamodelowanej warstwy interfejsowej w układzie Ta/Co₄₀Fe₄₀B₂₀/MgO przy wykorzystaniu modelu dyfuzyjnego transportu spinowego, co umożliwiło wyznaczenie efektywnego kąta spinowego Halla w funkcji temperatury, oddzielnie dla metalu ciężkiego i warstwy interfejsowej.

Prace [P3] miała 22 obce cytowania a [P4] 40 cytowań obcych co potwierdza istotność tych badań dla stanu wiedzy w obszarze elementów spintronicznych.

Uzyskane rezultaty prac badawczych wskazują na dobrą intuicję badawczą mgr inż. Moniki Cetot i stanowią jej oryginalny wkład w rozwój elektroniki spinowej. Autorka wykazała się umiejętnością przekonującego i poprawnego przedstawienia wyników prac badawczych. W sposób prawidłowy zaplanowała i opisała przeprowadzone eksperymenty oraz uzyskane rezultaty. Przygotowana rozprawa ma poprawny układ, który nie budzi żadnych zastrzeżeń. Praca jest bardzo dobrze przygotowana od strony edytorskiej.

Na podkreślenie zasługuje duża i różnorodna ilość badań obejmujących właściwie zaplanowane eksperymenty oraz wszechstronną charakteryzację wytworzonych warstw przy użyciu adekwatnych i różnorodnych metod badawczych. Podnosi to walory rozprawy i pozwala stwierdzić, że sformułowane przez Autorkę cele rozprawy zostały osiągnięte.

Rozprawa nie ma istotnych wad i niedociągnięć. Zdaniem Recenzenta uzasadnione byłoby bardziej rozbudowane uzasadnienie motywacji podjęcia prac badawczych.

Recenzent stwierdza, że rozprawa mgr inż. Moniki Cetot stanowi oryginalny i samodzielny dorobek Autorki oraz spełnia z wyraźnym nadmiarem wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy. Dlatego biorąc pod uwagę dorobek naukowy mgr inż. Moniki Cetot i pozytywną ocenę Jej rozprawy doktorskiej uważam, że w myśl ustawy z 14 marca 2003 r. (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z późn. zm.) o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki mgr inż. Moniki Cetot spełnia wymagania stawiane kandydatom do stopnia naukowego doktora nauk technicznych, w dyscyplinie Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika, wnioskuję o dopuszczenie do publicznej obrony przedstawionej rozprawy oraz stawiam wniosek o jej wyróżnienie.

R. Benkiewicz

