



Prof. dr hab. Piotr Przysławski

IF PAN

Warszawa

mail: przys@ifpan.edu.pl

Warszawa 1.05.2022

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

06.05.2022

Wpłynęło dnia
Zarejestrowano pod nr
Podpis *dm*

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Moniki Cecot

**pt. „ Elementy elektroniki spinowej:magnetyczne złącza tunelowe oraz hetero
struktury spinowego efektu Halla metal-ciężki- ferromagnetyk”**

Rozprawa doktorska mgr inż. Moniki Cecot obejmuje optymalizację działania magnetycznych złącz tunelowych (MTJ) oraz badania układów metal ciężki-ferromagnetyk charakteryzujących się spinowym efektem Halla.

Podzespoły te są elementami układów spintronicznych, czyli elektroniki spinowej, stanowiącej nowy rodzaj technologii, która wykorzystuje spinowy moment pędu elektronu do manipulacji ruchem elektronów lub przechowywania informacji. W odróżnieniu od konwencjonalnych podzespołów wykorzystujących tylko ładunek elektronu, podzespoły spintroniczne są w stanie przetwarzać z dużą szybkością przy niższym zużyciu energii.

Efekt tunelowego magnetooporu (TMR) opiera się na koherentnym tunelowaniu elektronów z pasma $\Delta 1$ poprzez epitaksjalną barierę MgO. Wielkość zmiany oporu TMR jest główną właściwością MTJ. Podstawowa koncepcja efektu TMR została zaproponowana przez Jullier'a. Zgodnie z jego modelem wielkość TMR zależy od efektywnej polaryzacji prądu tunelowego poprzez barierę. W idealnym przypadku dla całkowitej polaryzacji wielkość TMR byłaby nieskończona. Jednakże, praktycznie osiągnane wielkości tego parametru są znacznie mniejsze.

Stąd też, istnieje potrzeba dalszej optymalizacji MTJ charakteryzujących się jak największą wartością parametru TMR.

Opisane problemy badawcze wpisują się w tradycję badań MTJ w grupie prof. Tomasza Stobieckiego.

Rozprawa doktorska mgr. Moniki Cecot składa się z 6 Rozdziałów i cyklu czterech publikacji.

Doktorantka jest pierwszym autorem w dwóch publikacjach a w jednej jest drugim autorem. Fakt ten świadczy o znaczącym wkładzie doktorantki w powstanie tych publikacji naukowych w bardzo dobrych czasopismach z listy filadelfijskiej.

Głównym celem badań w pierwszej części rozprawy doktorskiej było określenie wpływu wielowarstw bufora na wybrane parametry MTJ.

W początkowym etapie badań doktorantka koncentrowała się na określeniu roli warstw buforowych na stopień ich steksturyzowania i szorstkości.

Badane elementy MTJ wytworzone zostały w firmie Singulus na utlenionych podłożach krzemowych.

Do tego celu zostało wytworzonych szereg heterostruktur typu bufor/ $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}/\text{MgO}(2)/\text{Ta}(5)$. W tych heterostrukturach zastosowano sześć różnych pod względem składu i grubości warstw buforowych.

Przeprowadzona analiza wykazała, że stopień steksturyzowania warstw buforowych i szorstkość międzypowierzchni wywiera znaczny wpływ na wartość pola anizotropii i wielkość współczynnika tłumienia Gilberta. Doktorantka wykazała, że najwyższą wartość współczynnika tłumienia zmierzono dla dobrze steksturyzowanej wielowarstwy buforowej $\text{Ta}(5)/\text{Ru}(10)/\text{Ta}(5)$. Z drugiej strony najmniejszą wartość parametru tłumienia zaobserwowano dla warstwy buforowej $\text{Ta}(5)$. Próbka z tym buforem charakteryzują się również najmniejszą wartością parametru tłumienia i małym stopniem szorstkości.

Rezultaty te zostały opublikowane w pracy P1.

W dalszym etapie badań doktorantka badała wpływ warstw buforowych na krytyczną wartość prądu przełączającego i parametr stabilności termicznej heterostruktur typu bufor/ $\text{Fe}_{60}\text{Co}_{20}\text{B}_{20}/\text{MgO}(1.28)/\text{Ta}(5)/\text{Ru}(5)$.

Moim zdaniem doktorantka powinna skomentować fakt innego składu warstwy ferromagnetyka w tej serii, w porównaniu do składu ferromagnetyka z poprzedniej serii.

Zastosowano trzy rodzaje wielowarstw buforowych. Wytworzone heterostruktury charakteryzowały się prostopadłą do powierzchni osią anizotropii magnetycznej.

Dla tej serii próbek stwierdzono obecność magnetycznie nieaktywnej części warstwy ferromagnetyka. Najcieńszą magnetycznie nieaktywną warstwę w ferromagnetyku zaobserwowano dla wielowarstwy buforowej $\text{Ta}(5)/\text{Ru}(20)\text{Ta}(5)$. Ta heterostruktura z kolei wykazała najsilniejszy stopień steksturyzowania i najwyższą szorstkość międzypowierzchni

Ta-CoFeB. Najgrubszą magnetycznie nieaktywną warstwę w ferromagnetyku zaobserwowano dla heterostruktury z wielowarstwą buforową Ta(5)/Ru(10)/Ta(3). Dla tej heterostruktury stwierdzono niski poziom stekstrowania i najmniejszą szorstkość. Stwierdzono, że pole anizotropii heterostruktury z wielowarstwą bufora Ta(5)/Ru(10)/Ta(3) jest wyższe niż pole anizotropii heterostruktury z wielowarstwą buforową Ta(5)/Ru(20)Ta(5). Stosując metodę pomiaru CIMS zmierzono wartość prądu przełączającego. Najniższą wartość zaobserwowano dla heterostruktury z wielowarstwą buforową Ta(5)/Ru(10)/Ta(3). Z drugiej strony dla tej heterostruktury określono najwyższy parametr stabilności termicznej. Analiza badań mikrostrukturalnych i pomiar parametru tłumienia wykazały, że parametr tłumienia Gilberta dla silnie steksturyzowanej próbki jest o 44% wyższy niż dla próbek słabo steksturyzowanych.

Doktorantka wykazała także, że im cieńsza jest warstwa Ta w wielowarstwie bufora tym silniejszy jest proces interdyfuzji pomiędzy warstwą Ta a warstwą FeCoB.

Rozdział 4 rozprawy doktorskiej poświęcony jest również podzespołom elektronicznym wykorzystującym spinowy efekt Halla (SHE).

W układzie metal ciężki-ferromagnetyk można wygenerować prąd spinowy z prądu ładunkowego poprzez SHE. W tym zjawisku oddziaływanie spin orbita odgrywa główną rolę. Ogólnie im wyższa jest liczba atomowa danego pierwiastka tym większy jest SHE.

Prąd spinowy, bądź dokładniej zastosowanie momentu spinowego wykorzystuje się do manipulowania namagnesowaniem. Ten mechanizm z kolei stosowany jest również np. do budowy pamięci magnetycznych MRAM.

W nawiązaniu do tego problemu doktorantka badała dwuwarstwy W/CoFeB charakteryzujące się prostopadłą osią anizotropii (PMA). Doktorantka analizowała trzy dwuwarstwy z różną grubością subwarstw W od 2 do 6 nm. Przeprowadzona analiza wykazała zależność interdyfuzji na granicy W-CoFeB od grubości warstwy bufora, Doktorantka wykazała zależność PMA od grubości warstwy W. Cieńsza warstwa bufora sprawiła że proces interdyfuzji był większy.

Wykorzystując metodę pomiarów harmonicznego napięcia Halla, doktorantka wyznaczyła wartość podłużną i poprzeczną efektywnego pola oddziaływania spin-orbita (SOT).

W dalszym etapie pracy doktorantka wyznaczyła efektywny parametr określający stopień tłumienia zdefiniowany jako stosunek prądu spinowego do prądu ładunkowego ξ , który określa spinowy kąt Halla. Najwyższą wartość parametru ξ osiągnięto dla dwuwarstwy W(2)-CoFeB. Analiza mikrostruktury wskazała zatem, że im cieńsza jest warstwa W w dwuwarstwie, tym znaczniejszy jest proces interdyfuzji pomiędzy W a warstwą CoFeB. Proces ten z kolei indukuje większą wartość parametru ξ .

