

„Spinowa magnetorezystancja i spinowy efekt Halla w cienkowarstwowych układach hybrydowych: metal ciężki, ferromagnetyk, antyferromagnetyk”

Streszczenie

Opracowanie nowych, energooszczędnych technologii przechowywania i przetwarzania informacji w oparciu o spin elektronu wzbudza szerokie zainteresowanie z punktu widzenia potencjalnych zastosowań w obszarze energooszczędnych pamięci elektronicznych wpisujących się w trend tzw. Green IT. Metale ciężkie (HM), wykazujące silne sprzężenie spinowo-orbitalne, takie jak Pt i W, są badane pod kątem wykorzystania ich jako źródła prądu spinowego. Wygenerowany prądem spinowym spinowo-orbitalny moment siły (SOT) jest w stanie przełączyć prostopadłe namagnesowanie warstwy ferromagnetycznej (FM) w zewnętrznym polu magnetycznym współliniowym z prądem, co jednak znacznie ogranicza praktyczne jego zastosowanie. Odpowiedzią na ten problem jest zastosowanie warstwy antyferromagnetycznej (AFM), która dzięki wymiennemu interfejsowemu sprzężeniu z warstwą ferromagnetyczną (tzw. exchange bias) jest w stanie złamać symetrię przestrzenną układu i umożliwić przełączenie prądowe magnetyzacji ferromagnetyka bez zewnętrznego pola magnetycznego. Praca opisuje eksperymentalne badania cienkowarstwowych heterostruktur spintronicznych typu HM/FM, FM/HM/FM oraz HM/FM/AFM charakteryzujących się znacznym oddziaływaniem spinowo-orbitalnych. Niniejsza rozprawa opiera się na czterech pracach opublikowanych wcześniej w czasopismach naukowych z listy JCR oraz jednej, która jest w przygotowaniu, w których Autor był głównym pomysłodawcą i wykonawcą podstawowych eksperymentów.

Praca podzielona jest na dwie główne części, w skład których wchodzi wprowadzenie teoretyczne oraz opis i dyskusja przeprowadzonych badań. W części pierwszej omówiono teoretyczne podstawy zjawisk obserwowanych w eksperymencie takich jak efekty galwanomagnetyczne oraz efekty związane z oddziaływaniami spinowo-orbitalnymi jak chociażby sprzężenie spino-orbitalne w metalach ciężkich, spinowy efekt Halla, spinowo-orbitalny moment siły oraz oddziaływanie exchange bias. Część eksperymentalną rozpoczyna opis badań układu biwarstwowego HM/FM na przykładzie szeregu próbek, w których rolę metalu ciężkiego pełniły głównie W, Pt i Au, natomiast warstwę ferromagnetyczną stanowił Co i stop CoFeB. W rozdziale tym zostały omówione wyniki badania spinowej magnetorezystancji (SMR) i anizotropowej magnetorezystancji (AMR) wraz z analizą danych eksperymentalnych z wykorzystaniem teoretycznego dyfuzyjnego modelu prądu spinowego wyznaczono udziały SMR i AMR w wypadkowej magnetorezystancji. Dodatkowo wyznaczono efektywne kąty Halla w funkcji grubości Pt w układach $Pt(t_{Pt})/CoFeB(2)$ i $[Pt/Ti]/Pt/CoFeB(2)$ (liczby w nawiasach podają grubości warstw w nanometrach). Przeanalizowano także kształt pętli przełączania prądowego w układzie $Pt(4)/Co(1)/MgO$ za pomocą modelu fenomenologicznego z uwzględnieniem efektu DMI.

Następnie skupiono się na układzie trójwarstwowym $Co(1)/Pt(0-4)/Co(1)$, gdzie omówiona została dynamika namagnesowania warstw Co, właściwości magnetostatycznego przemagnesowania z pętli anomalnego efektu Halla AHE oraz oddziaływanie spinowo-orbitalne. Zmienna grubość Pt umożliwia efektywne dostrojenie ferromagnetycznego w

sprężenia wymiennego (IEC). Efekty SMR i AMR analizowano w oparciu o dyfuzyjnego transportu spinowego. Wyznaczono i przeanalizowano efektywne pole SOT (field-like (H_{FL}) i damping-like (H_{DL})) oraz efektywny spinowy kąt Halla w funkcji grubości Pt. Wyniki eksperymentalne zostały porównane z teoretycznymi obliczeniami modelu transportu spinowego. Asymetria obu interfejsów: dolnego Co/Pt i górnego Pt/Co, oraz obecność IEC umożliwiają uzyskanie wielopoziomowego przełączania prądowego magnetyzacji, mającego potencjalne zastosowanie w pamięciach SOT.

W ostatnim podrozdziale omówiono wyniki eksperymentalne przełączania prądowego magnetyzacji indukowanego przez SOT w heterostrukturach Pt(W)/Co/NiO o zmiennej grubości warstw W i Pt, prostopadle namagnesowanej warstwie Co oraz antyferromagnetycznej warstwie NiO. Wykorzystując przełączanie prądowe magnetyzacji, pomiary magnetorezystancji oraz anomalny efekt Halla, wyznaczono prostopadłą i płaszczyznową składową pola exchange bias. Następnie do wyników otrzymanych dla kilku nanourządzeń z obu układów, dopasowano analityczny model krytycznego prądu przełączania w funkcji grubości metalu ciężkiego. W efekcie wyznaczono efektywny spinowy kąt Halla i efektywną anizotropię prostopadłą. Dodatkowo za pomocą dopasowania modelu teoretycznego do danych eksperymentalnych odtworzono zależność SMR w funkcji grubości Pt. Pomiary metodą harmonicznym polowym pozwoliły wyznaczyć wartości efektywnego spinowego kąta Halla w funkcji grubości HM w układach Pt(W)/Co(0.7)/NiO.

Ponadto w pracy doktorskiej omówione zostały technologie wytwarzania kompletnej heterostruktury spinowego efektu Halla metodą litografii optycznej oraz przedyskutowane zostały metody wyznaczania spinowego kąta Halla metodą harmonicznym kątowych i polowych, metody pomiarów magnetorezystancyjnych a także schemat eksperymentów przełączania prądowego magnetyzacji.

10. 05. 2023 r.

Ungert Goda