

MONIKA CECOT - AUTOREFERAT

TYTUŁ ROZPRAWY DOKTORSKIEJ:

Elementy elektroniki spinowej: magnetyczne złącza tunelowe oraz heterostruktury spinowego efektu Halla metal ciężki - ferromagnetyk

Autor: Monika Joanna Cecot

Promotor rozprawy: prof. dr hab. Tomasz Stobiecki

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Witold Skowroński

Praca wykonana: Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji Instytut Elektroniki; Kraków, 2022

1 WPROWADZENIE

Praca doktorska dyskutuje wyniki badań magnetycznych złącz tunelowych i heterostruktur spinowego efektu Halla, które znajdują zastosowanie w magnetycznych pamięciach o dostępie swobodnym *RAM*, nazwanych ze względu na wykorzystywany fizyczny efekt, odpowiednio *STT-MRAM* (Spin Transfer Torque - Magnetoresistive Random Access Memory) i *SOT-MRAM* (Spin Orbit Torque - Magnetoresistive Random Access Memory).

Podstawowa komórka pamięci *STT-MRAM* to dwie cienkie warstwy ferromagnetyka rozdzielone niemagnetyczną warstwą izolatora stanowiącą barierę tunelową. Spolaryzowane spinowo w pierwszej warstwie ferromagnetycznej elektrony tunelują do drugiej warstwy ferromagnetycznej powodując ultra szybkie (10^{-9} s) przełączenie magnetyzacji. Zmianom względnego kierunku namagnesowań warstw ferromagnetycznych towarzyszy zmiana rezystancji, umożliwiającą odczyt informacji przy niewielkim prądzie przepływającym przez złącze. Wyzwaniem jest zapis informacji, ponieważ duża gęstość prądu oznacza ryzyko przebicia bariery tunelowej, natomiast zaprojektowanie złącza pod zbyt małe gęstości prądu prowadzi do jego niestabilności termicznej, dlatego optymalizacja grubości i gładkości powierzchniowej bariery tunelowej to podstawowy problem w technologii złącz tunelowych wytwarzanych na skalę przemysłową. Wpływ na parametry złącza mają nie tylko warstwy aktywne magnetycznie wchodzące w jego skład, ale także warstwy leżące pod nim tzw. warstwy buforowe. Zmieniając materiał, grubość, parametry wygrzewania i osadzania warstw buforowych można wpływać na parametry magnetycznego złącza tunelowego, między innymi na pole anizotropii, namagnesowanie nasycenia czy tłumienie precesji namagnesowania. Dzieje się tak dlatego, że przy warstwach o grubościach od kilku do kilkunastu warstw atomowych znaczenie mają nawet niewielkie szorstkości, tekstura krystalograficzna, domieszkowanie czy wymieszanie na styku poszczególnych warstw.

W przypadku heterostruktur spinowego efektu Halla wykorzystywanych do stworzenia pamięci *SOT-MRAM* prądy spinowe są generowane w niemagnetycznych metalach

ciężkich wykazujących spinowy efekt Halla. Spinowo-orbitalne rozpraszanie elektronów prowadzi do poprzecznej do kierunku przepływu prądu ładunkowego akumulacji spinów, którą wykorzystuje się do wzbudzenia w warstwie ferromagnetyka precesji wektora namagnesowania lub zmiany jego zwrotu. W ten sposób można wyeliminować z klasycznej pamięci *MRAM* konieczność przepływu prądu przez złącze tunelowe w trakcie zapisu informacji zastępując go planarnym prądem zapisu pochodzącym od oddziaływania spinowo-orbitalnego w warstwie metalu ciężkiego. Wykorzystanie efektu polaryzacji spinowo-orbitalnej w pamięciach *MRAM* jest wciąż na etapie badań, które w dużym stopniu koncentrują się na uzyskaniu jak największego współczynnika tzw. spinowego kąta Halla będącego stosunkiem gęstości prądu spinowego do gęstości prądu ładunkowego.

2 TEZY PRACY

W pracy postawiono dwie główne tezy:

- struktura krystaliczna oraz szorstkość topograficzna warstw buforowych mają znaczący wpływ na parametry magnetyczne i strukturalne zarówno dolnej elektrody magnetycznego złącza tunelowego jak i na parametry kompletnego złącza *MTJ*,
- wymieszanie na styku warstw metal ciężki/ferromagnetyk w heterostrukturach spinowego efektu Halla wpływa na wartość współczynnika konwersji prądu ładunkowego na prąd spinowy.

3 ZASTOSOWANE METODY POMIAROWE

Układy wielowarstwowe naniesione metodą rozpylania jonowego przed nanostrukturyzacją do postaci aplikacyjnego elementu spintronicznego, przechodzą systematyczne badania strukturalne mające na celu wyznaczenie rzeczywistych grubości poszczególnych warstw, ustalenie struktury krystalicznej (analiza fazowa, rozmiar krystalitów, tekstura, wymieszenie na stykach warstw). W tym celu na warstwach ciągłych przeprowadzono: pomiary dyfrakcji promieniowania rentgenowskiego *XRD*, pomiary rentgenowską metodą reflektometryczną *XRR*, badania szorstkości atomowej powierzchni z użyciem mikroskopu sił atomowych *AFM*. Do zobrazowania przekroju poprzecznego układu wielowarstw *HM/FM* (heavy metal/ ferromagnet) wykorzystano transmisyjny mikroskop elektronowy, działający w trybie wysokiej rozdzielczości *HRTEM*.

Ponadto na warstwach ciągłych za pomocą magnetometru wibracyjnego przeprowadzono temperaturowe pomiary namagnesowania spontanicznego, nasycenia oraz pętli histerezy namagnesowania. Do detekcji dynamiki namagnesowania i wyznaczenia tłumienia precesji wykorzystane zostały następujące techniki mikrofalowe: szerokopasmowy rezonans mikrofalowy (*scalar network analysis ferromagnetic resonance SNA-FMR*) oraz pomiar indukowanych impulsem sygnałów gasnących *pulse inductive microwave magnetometry (PIMM)*.

Strukturyzacja złącz tunelowych oraz wielowarstw bufor/*HM/FM*/MgO została wykonana w Laboratorium Ablacji Laserowej i Nanolitografii *ACMiN* AGH.

Pomiary temperaturowe spinowego kąta Halla i dynamiki magnetyzacji wzbudzonej torkiem spinowo-orbitalnym zostały przeprowadzone metodą pomiaru harmonicznym napięcia Halla.

4 NAJWAŻNIEJSZE WYNIKI

W pracy [P1] wykazałam, że wielkość pola anizotropii, w obrębie warstw buforowych, koreluje ze stopniem stekstrowania oraz szorstkością. Dobrze steksturyzowany układ $Ta(5)/Ru(10)/Ta(5)$ o $RMS = 0,34$ nm i średniej wielkości ziaren równej około 22 nm, posiada najwyższy poziom współczynnika tłumienia precesji namagnesowania równy $\alpha = 10,7 \cdot 10^{-3} \pm 3 \cdot 10^{-4}$. Z kolei najgładszy układ, z warstwą amorficznego Ta (o grubości 5 nm) posiada najniższą wartość tłumienia $\alpha = 5,1 \cdot 10^{-3} \pm 2 \cdot 10^{-4}$. Podobny poziom tłumienia, $\alpha = 5,7 \cdot 10^{-3} \pm 2 \cdot 10^{-4}$ wykazywała silnie steksturyzowana warstwa $Ta(5)/CuN(30)/Ta(5)$.

W pracy [P2] koncentrowałam się na wpływie warstw buforowych zarówno na dolną elektrodę jak i na kompletny układ złącza MTJ z anizotropią prostopadłą. Wpływ warstw buforowych na parametry magnetyczne dolnej elektrody jak i parametry charakteryzujące pełne złącze MTJ prąd krytyczny J_c i stabilność termiczną Δ^{avg} przejawia się w dużej mierze w grubościach warstwy magnetycznie martwej. Dla bufora Ta o najmniejszej teksturze grubość warstwy magnetycznie martwej jest największa. Pomiedzy układami uzyskano różnice w wartościach prądów krytycznych sięgające różnicy 20% dla układu o najniższym poziomie J_c w porównaniu do układu z najwyższą wartością J_c , jednakże różnica w otrzymanych wartościach parametru stabilności termicznej Δ^{avg} jest praktycznie dwukrotna, odpowiednio: 63 i 32,5. Zatem struktura warstwowa bufora $Ta(5)/Ru(10)/Ta(3)$ sprzyja uzyskaniu dobrych wartości parametrów J_c i Δ^{avg} . Podobnie jest w przypadku parametru tłumienia precesji namagnesowania. Dla dobrze steksturyzowanego bufora $Ta(5)/Ru(20)/Ta(5)$ wartość tłumienia jest o 44 % większa niż w przypadku gładszego bufora $Ta(5)/Ru(10)/Ta(3)$. Optymalizując zatem parametry warstw buforowych można uzyskać wysoką wartość stabilności termicznej przy jednoczesnym utrzymaniu niskiej wartości gęstości prądu przełączania i niewielkim tłumieniu precesji magnetyzacji.

Publikacje [P3] i [P4] prezentują wyniki systematycznych temperaturowych pomiarów harmonicznych napięcia Halla w układach: $W/Co_{12}Fe_{68}B_{20}$ i $Ta/Co_{40}Fe_{40}B_{20}$ o różnych grubościach metali ciężkich. W przypadku układu $W/Co_{12}Fe_{68}B_{20}$ grubość warstwy metalu ciężkiego silnie wpływa na jego parametry strukturalne. Między grubościami 4nm i 6nm zaobserwowano przejście fazowe odpowiednio z wysoko rezystywnej fazy β -W do fazy α -W. Wartość efektywnego kąta Halla dla układu $W/Co_{12}Fe_{68}B_{20}$ silnie zależy od temperatury uzyskując 0,55 w temperaturze 19K i 0,25 w temperaturze pokojowej. Z pomiarów XRR otrzymano dużą szorstkość interfejsu HM/FM oznaczającą silne wymieszanie na styku metalu ciężkiego i ferromagnetyka powodujące wzmocnienie efektów spin-orbita.

Duże wymieszanie na interfejsie zaobserwowano także dla układu $Ta/Co_{40}Fe_{40}B_{20}$. W obu przypadkach wyniki pomiarów reflektometrii rentgenowskiej XRR potwierdziły obrazy wykonane przy pomocy wysokorozdzielczego elektronowego mikroskopu skaningowego. Przeprowadzone pomiary temperaturowe składowych pola efektywnego dla trzech grubości $Ta = 5$ nm, 10 nm i 15 nm pozwoliły na zaadaptowanie teoretycznego modelu dyfuzyjnego transportu spinowego i wyznaczenie w funkcji temperatury spinowego kąta Halla osobno dla Ta i warstwy interfejsowej o grubości oszacowanej z badań strukturalnych. Wartość kąta Halla dla Ta jest praktycznie stała w funkcji temperatury i wynosi -0,2, natomiast efektywność warstwy interfejsowej (interfejsowy kąt Halla) ma charakter rosnący ze wzrostem temperatury zmieniając znak w przedziale temperatur 150 - 200K. Zmiana znaku wskazuje, że interfejsowy kąt Halla należy traktować jako efektywny współczynnik konwersji prądu spinowego, na który mają wpływ zarówno warstwa

Ta, jak i ferromagnetyczna CoFeB, których zachowanie w wyższych temperaturach może różnić się w wyniku utraty pamięci spinowej SML (Spin Memory Loss).

5 PUBLIKACJE WCHODZĄCE W SKŁAD CYKLU

- [P1] M. Cecot, J. Wrona, J. Kanak, S. Ziętek, W. Skowroński, A. Żywczak, M. Czapkiewicz and T. Stobiecki, 'Magnetic properties and magnetization dynamics of magnetic tunnel junction bottom electrode with different buffer layers', *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, no. 11, pp. 1–4, 2015.
Journal Impact Factor (2020): 1.7, liczba cytowań (bez autocytowań): 0.
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.
Journal Impact Factor (2020): 2.55, liczba cytowań (bez autocytowań): 11.
DOI: 10.1063/1.4922499
- [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.
Journal Impact Factor (2020): 3.79, liczba cytowań (bez autocytowań): 21.
DOI: 10.1063/1.4960793
- [P4] M. Cecot, Ł. Karwacki, W. Skowroński, J. Kanak, J. Wrona, A. Żywczak, L. Yao, S. van Dijken, J. Barnaś, 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.
Journal Impact Factor (2020): 4.38, liczba cytowań (bez autocytowań): 42.
DOI: 10.1038/s41598-017-00994-z

Załącznik:

- [A1] S. Ziętek, M. Cecot, W. Skowroński and 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.
Journal Impact Factor (2020): -, liczba cytowań (bez autocytowań): 1.
DOI: 10.1109/MIKON.2016.7492130

Podane powyżej liczby cytowań pochodzą z bazy *Web of Science*, stan z dnia 08.06.2022.