

STRESZCZENIE

Elementy elektroniki spinowej mogą być miniaturyzowane do rozmiarów nanometrowych przy jednoczesnym zwiększeniu szybkości przetwarzania informacji i zmniejszeniu pobieranej energii przez wykorzystujący je układ scalony. Jest to możliwe dzięki wykorzystaniu generowanych w cienkich warstwach prądów spinowych, których momenty siły sterują wektorem magnetyzacji warstwy ferromagnetycznej prowadząc do jego precesji bądź zmiany kierunku. W przypadku pamięci operacyjnych MRAM i twardych dysków zmiana kierunku wiąże się z zapisem informacji. Przełączenie zewnętrznym polem magnetycznym jest najprostszym przykładem manipulacji wektorem magnetyzacji, jednak z punktu widzenia zastosowania w energooszczędnych pamięciach magnetycznych o dużej pojemności zupełnie niepraktycznym. Stąd duże zainteresowanie efektami indukowanego prądem przełączenia magnetyzacji.

Pierwszym omawianym w pracy efektem jest spinowy transfer momentu siły (STT) wykorzystywany w magnetycznych złączach tunelowych (MTJ). Pamięci magnetyczne o swobodnym dostępie MRAM oparte o MTJ-STT, choć są już dostępne w komercyjnej sprzedaży, wymagają dalszych badań, które umożliwiłyby zwiększenie niezawodności i pojemności.

Drugim efektem jest spinowo-orbitalny moment siły pochodzący z separacji kierunkowej prądu ładunkowego i spinowego. Ten efekt zachodzi w heterostrukturach spinowego efektu Halla składających się z ferromagnetyka i niemagnetycznej warstwy metalu ciężkiego wykazującego sprzężenie spin-orbita.

Praca podzielona jest na dwie główne części w skład których wchodzi: wprowadzenie teoretyczne, dwie publikacje oraz podsumowanie przeprowadzonych badań. W części pierwszej prezentuję badania wpływu różnych warstw buforowych (warstw oddzielających podłoże od warstw aktywnych magnetycznie), w szczególności *Ta*, *Ta/CuN/Ta*, oraz *Ta/Ru/Ta* na parametry magnetyczne dolnej elektrody $Co_{40}Fe_{40}B_{20}$ magnetycznego złącza tunelowego jak i na kompletne złącze $Fe_{60}Co_{20}B_{20}/MgO/Fe_{60}Co_{20}B_{20}$. W tym celu wykorzystywane są techniki charakteryzacji strukturalnej oparte o badania dyfrakcji rentgenowskiej, topografię powierzchni metodą mikroskopii sił atomowych, pomiary tłumienia precesji magnetyzacji, pomiary parametrów przełączania. W obu przypadkach wykazano istotny wpływ warstw buforowych na parametry magnetyczne warstwy ferromagnetycznej. Silna tekstura strukturalna oraz szorstkość topograficzna powierzchni korelują ze zwiększonym polem anizotropii. Z kolei dla układów z buforami polikrystalicznymi i amorficznymi o mniejszych szorstkościach otrzymano niższe wartości tłumienia precesji magnetyzacji. W obrębie badanych próbek kompletnych złącz, prąd przełączania i stabilność termiczna różniły się między układami o różnych warstwach buforowych odpowiednio o 20% i 40% na korzyść bufora o mniejszym stopniu utekstuwowania.

Druga część pracy przedstawia wyniki badań heterostruktur spinowego efektu Halla w układach: $W/Co_{12}Fe_{68}B_{20}$ i $Ta/Co_{40}Fe_{40}B_{20}$ o różnych grubościach metali ciężkich *W* i *Ta*. Przeprowadzono systematyczne badania temperaturowe spinowego efektu Halla w oparciu o pomiar harmonicznych napięcia anomального efektu Halla. Dla układu $W/Co_{12}Fe_{68}B_{20}$ uzyskano wysoką wartość kąta Halla, będącego parametrem konwersji prądu ładunkowego na prąd spinowy, sięgającą nawet 0,55 w niskich temperaturach i 0,25 w temperaturze pokojowej.

Oba układy zostały poddane dokładnym badaniom strukturalnym ze szczególną uwagą poświęconą obszarom styku metalu ciężkiego i ferromagnetyka. Wyniki badań przeprowadzonych przy wykorzystaniu wysokorozdzielczej transmisyjnej mikroskopii elektronowej wykazały dyfuzyjne wymieszanie na interfejsie. Zamodelowana warstwa interfejsowa została zaadaptowana do teoretycznego modelu transportu spinowego w celu wyznaczenia w funkcji temperatury efektywnego spinowego kąta Halla, osobno dla metalu ciężkiego i warstwy interfejsowej. Co ciekawe wartość efektywnego kąta Halla dla Ta utrzymuje się na poziomie 0,2 niezależnie od zmian temperatury, podczas gdy efektywność dla warstwy interfejsowej silnie zależy od temperatury.

Ponadto omówiłam technologie wytwarzania kompletnej komórki pamięci MTJ i heterostruktury spinowego efektu Halla metodą litografii elektronowej. Również obszernie przedyskutowałam metody elektrycznej detekcji dynamiki magnetyzacji oraz metodę wyznaczania spinowego kąta Halla poprzez pomiar harmonicznych napięcia anomalnego efektu Halla.

28.03.2022

Kamila Cewst

ABSTRACT

Spin electronics components can be miniaturized up to nanometer dimensions with energy consumption reduction and increasing speed of data processing. Ferromagnetic layer magnetization vector is tilted from its equilibrium position due to spin current generated in thin layers leading to radio frequency precession or magnetization vector direction switching. In the case of large-capacity memories, switching the magnetization with an external magnetic field is infeasible. This is the reason of the growing interest of current induced effects capable of magnetization switching without any external magnetic field support.

The first effect presented in thesis below is spin transfer torque (STT) used in tunnel magnetic junction. Despite the fact that non-volatile magnetic random access memories MRAMs utilizing STT effect are already in commercial sale, they need a further research to increase reliability and capacity.

The second covered effect is spin-orbit torque (SOT) observed in thin heterostructures composed of heavy metal and ferromagnet HM/FM. Spin Hall effect (SHE) taking place in the non-magnetic heavy metal layer causes direction separation of spin and charge currents.

This thesis is divided in two parts preceded by introduction and description of the measurements methods used to structural and magnetic characterization. Each part consists of theoretical introduction, two publications and summary. In the first part I discuss research on the buffer layers: Ta , $Ta/CuN/Ta$ and $Ta/Ru/Ta$, influence on the magnetic parameters of the magnetic tunnel junction bottom electrode $Co_{40}Fe_{40}B_{20}$ and on the full stack of the MTJ $Fe_{60}Co_{20}B_{20}/MgO/Fe_{60}Co_{20}B_{20}$. For this purpose, structural characterization research utilized X ray-diffraction methods, atomic force microscopy, measurements of the magnetization precession damping and switching parameters has been carried out. In both cases, a significant influence of the buffer layers (layers separating the substrate from the magnetically active layers) on the magnetic parameters of the ferromagnetic layer was demonstrated. Higher texture induces surface topological roughnesses which correlate with anisotropy field increase. In turn smoother polycrystalline and amorphous buffers give lower values of the magnetization precession damping parameter. Within the complete MTJ stack, the switching current density and thermal stability factor differed between systems with different buffer layers by 20% and 40% respectively, in favour of the buffer with a lower atomic structure order.

Second part contains research on spin Hall effect heterostructures: $W/Co_{12}Fe_{68}B_{20}$ and $Ta/Co_{40}Fe_{40}B_{20}$ with different buffers thickness. Systematic temperature measurements of the spin Hall effect were done by means of harmonic anomalous Hall (AHE) voltage measurements. For $W/Co_{12}Fe_{68}B_{20}$ achieved a high value of spin Hall angle which is the charge current to spin current conversion parameter. For low temperature effective spin Hall angle has reached 0.55 and 0.25 at room temperature.

Both systems went thorough structural investigations with particular attention to the interfaces between heavy metal and ferromagnetic. The results of the high-resolution transmission electron microscopy showed strong mixing on the interface, so the theoretical model of spin diffusion transport was adapted in order to determine the effective spin Hall angle separately for heavy metal and interface layer as a function of temperature. Interest-

ingly, the value of the effective Hall angle for Ta remains at 0.2 regardless of temperature changes, while the efficiency for the interface layer strongly depends on the temperature.

Moreover, the complete memory cell MTJ and the spin Hall effect devices fabrication technology by means of electron lithography were discussed in details. The methods of electrical detection of magnetization dynamics were also discussed extensively, including the method of determining the spin Hall angle by measuring the Hall voltage harmonics.

28.03.2022

Mou'he Cewt