

Kraków, 17.05.2023

## STRESZCZENIE

Rozprawy doktorskiej Jakuba Pawłaka pt.:

### „Multiferroiczne złącza tunelowe oparte o BTO/LSMO sterowane prądem spinowym”

Opisane w rozprawie badania dotyczą multiferroicznych złącz tunelowych (MFTJ). Złącza te składają się z dwóch ferromagnetycznych elektrod oddzielonych warstwą ferroelektryka. MFTJ wykazują jednocześnie efekty tunelowego magnetooporu (TMR) oraz tunelowego elektrooporu (TER). Mogą one znaleźć zastosowanie w pamięciach RAM (ang. *Random Access Memory*) nowego typu – nieulotnych, przełączanych szybciej i z mniejszym poborem mocy. Ich działanie w temperaturze pokojowej oraz możliwość kontrolowania kierunków magnetyzacji elektrod bez użycia zewnętrznego pola magnetycznego, jest kluczowe dla ich zastosowań. Zmianę kierunku magnetyzacji umożliwiają m.in. dwa efekty wykorzystujące prąd spinowy: Spin-Transfer Torque (STT) oraz Spin-Orbit Torque (SOT). Pierwszy z nich wykorzystuje prąd o wysokiej gęstości płynący przez złącze. W przypadku drugiego wystarcza prąd płynący jedynie przez elektrodę, zmniejszając zużycie złącza oraz pobór mocy. Głównym celem badań było uzyskanie znacznych efektów TMR oraz TER w temperaturze pokojowej oraz sterowanie złączem z wykorzystaniem prądu lub napięcia.

Do wytworzenia tego typu złącz wybrano materiały: ferromagnetyczne  $\text{La}_{0,67}\text{Sr}_{0,33}\text{MnO}_3$  (LSMO) o dużej polaryzacji spinowej na poziomie Fermiego (pozwalające na teoretycznie duży TMR), ferroelektryczne  $\text{BaTiO}_3$  (BTO) oraz  $\text{SrTiO}_3$  (STO) jako podłoże. Należy podkreślić, że istnieje niewielka grupa materiałów wykazujących właściwości ferroelektryczne dla nanometrowej grubości warstw. Materiały te wymagają dobrze uporządkowanej krystalicznej struktury, aby zachować swoje własności. Z tego powodu wybór materiałów należy rozpatrywać całościowo z uwzględnieniem konieczności ich epitaksjalnego wzrostu.

Ze względu na dużą zmienność właściwości LSMO pod wpływem parametrów takich jak: naprężenia, stechiometria, temperatura etc. pierwszy etap badań polegał na optymalizacji procesu przygotowania atomowo gładkiego podłoża i analizie jego powierzchni techniką dyfrakcyjną RHEED (ang. *Reflection High-Energy Electron Diffraction*). Dużą uwagę poświęcono także procesowi wytwarzania wielowarstwowych struktur, który pozwalał zachować krystaliczną strukturę oraz ostre interfejsy. Zbadano m.in. wpływ przygotowania podłoża i warunków osadzania na właściwości magnetyczne LSMO. Kolejnym etapem było zbadanie właściwości magnetycznych i transportowych LSMO w strukturach wielowarstwowych, co jest istotne pod kątem zastosowania w złączach tunelowych. Zjawiska występujące w LSMO nie zostały do końca zrozumiane ze względu na jego skomplikowaną strukturę elektronową. Z tego powodu do analizy i interpretacji wyników posłużono się szerokim zestawem eksperymentalnych technik badawczych jak: RHEED, magnetometria VSM, ferromagnetyczny rezonans FMR, dyfrakcja rentgenowska XRD, reflektometria rentgenowska XRR, mikroskopia siła atomowych AFM, mikroskopia transmisyjna TEM etc., a także wykorzystano modele teoretyczne, fenomenologiczne oraz obliczenia DFT (ang. *Density Functional Theory*). Zaobserwowano m.in. znaczne zwiększenie oporu, magnetooporu i koercji LSMO na cienkim buforze  $\text{MgO}$ , co może być związane z naprężeniami.

Następnie, wielowarstwowe struktury poddano nanostrukturyzacji, aby uzyskać mikrometrowe złącza. Początkowo planowano dwa typy złącz: LSMO/BTO/LSMO, które ze

względu na wysoką polaryzację spinową elektrod teoretycznie mogło pozwolić uzyskać duży TMR oraz LSMO/BTO/MgO/LSMO, gdzie dodatkowa warstwa MgO w buforze pozwala zwiększyć TER. Niestety badania ujawniły wysoką niestabilność pracy tych urządzeń, powodowaną niszczącym działaniem trawienia jonowego na warstwy LSMO, BTO oraz STO. Rozwiązaniem było wykorzystanie złącz o architekturze metal/BTO/LSMO, w których dolną elektrodę oraz barierę tunelową pozostawiono jako warstwę ciągłą. Ponadto, napyłana w temperaturze pokojowej górna elektroda metaliczna nie wymagała trawienia, które zastąpiono techniką *lift-off*. Asymetryczna architektura złącza umożliwia wysoki TER, a zachowana struktura warstw tlenkowych wyższy TMR. Badania złącz Fe/BTO/LSMO ujawniły jedne z najwyższych wartości TMR oraz TER w temperaturze pokojowej. Ponadto przeprowadzone badania spinowego efektu diodowego wykazały możliwość wykorzystania efektu STT. W kolejnym kroku zastąpiono górną elektrodę Fe, dwuwarstwą Pt/Co pozwalającą wykorzystać efekt SOT. Wykonane pomiary SOT-FMR wykazały ciekawy efekt – dodatkowy sygnał pochodzący od dolnej elektrody pomimo pomiarów jedynie górnej warstwy złącza. Efekt może być związany z pompowaniem spinowym w LSMO, indukowanym polem Oersteda oraz zachodzącym odwrotnym spinowym efekcie Halla w górnej elektrodzie.

