

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Литвиненко Ярина Миколаївна**



УДК 538.975: [537.621.2 + 537.622 + 537.624 ] (043.3)

**ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ В ПРИЛАДОВИХ СТРУКТУРАХ  
З ПЕРПЕНДИКУЛЯРНОЮ МАГНІТНОЮ АНІЗОТРОПІЄЮ**

01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

**Суми – 2016**

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Сумському державному університеті  
Міністерства освіти і науки України

Наукові керівники: кандидат фізико-математичних наук, доцент  
**Бібік Віталій Володимирович**,  
Сумський державний університет,  
директор Конотопського інституту СумДУ;  
доктор наук, асоційований професор  
**Томас Хауєт (Thomas Hauet)**,  
Університет Лотарингії (м. Нансі, Франція),  
завідувач Центру дослідження магнетизму Інституту  
Жана Ламура Університету Лотарингії

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор  
**Товстолиткін Олександр Іванович**,  
Інститут магнетизму НАН України та МОН України,  
провідний науковий співробітник відділу фізики  
плівок;

доктор фізико-математичних наук, професор  
**Чепурних Геннадій Кузьмич**,  
Інститут прикладної фізики НАН України (м. Суми),  
провідний науковий співробітник відділу  
моделювання радіаційних ефектів та  
мікроструктурних перетворень у конструкційних  
матеріалах

Захист відбудеться «3» червня 2016 р. о 12<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 55.051.02 Сумського державного університету за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, корпус БІЦ, ауд. 307.

Із дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Сумського державного університету за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, а також на сайті інституційного репозитарію СумДУ. Режим доступу: <http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/44624>

Автореферат розіслано «29» квітня 2016 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



І. В. Чешко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Стрімкий розвиток мікро- та наноелектроніки викликає значний інтерес до пошуку нових та вдосконалення вже відомих тонкоплівкових наносистем, таких як мультишари, спін-вентилі, магнітні тунельні переходи (МТП) та ін. Однією з новітніх тенденцій у дослідженнях названих систем є пошук, одержання та вивчення фізичних властивостей матеріалів із перпендикулярною магнітною анізотропією (ПМА), які завдяки високій спін-поляризації, термічній стабільності, низькому критичному струму та можливості реалізації в них процесу перенесення спінового моменту вже знайшли практичне застосування в магнітоелектроніці, а саме у виготовленні жорстких дисків (HDD) з надщільним записом, пристроїв збереження інформації нового покоління (STT-MRAM), сенсорів, СВЧ-генераторів, а також мають перспективу використання в біомедичній інженерії.

Мультишари  $[\text{Co/Ni}]_n$  як об'єкт досліджень викликають значний науковий інтерес з точки зору їх практичного використання, оскільки це єдина мультишарова система з ПМА, до складу якої входять лише феромагнітні метали, та характеризується високою спін-поляризацією і значеннями ПМА до декількох  $\text{МДж/м}^3$ , які можуть змінюватись залежно від товщини шарів  $\text{Co}$  та  $\text{Ni}$ , що має вагоме значення при формуванні функціональних елементів із наперед заданими робочими характеристиками. Незважаючи на активне дослідження фізичних властивостей систем  $[\text{Co/Ni}]_n$ , використання цих мультишарів як електродів магнітних тунельних переходів супроводжується рядом невирішених проблем, пов'язаних із відсутністю однозначної інформації щодо умов формування цих плівкових систем з ПМА, їх структурних, магнітних та магнітотранспортних властивостей.

Використання магнітного тунельного переходу в якості елементарної комірки STT-MRAM технологій потребує детального дослідження фізичних процесів у плівкових структурах зі спін-залежним тунелюванням електронів. Оскільки МТП типу  $\text{Fe/MgO/Fe}$  є модельною системою для дослідження процесу спін-залежного тунелювання протягом останніх 15 років, то вони є оптимальною плівковою структурою для вивчення нових процесів і явищ, в тому числі, зміни магнітної анізотропії під впливом спін-поляризованого струму та впливу тривалості дії електричного поля на опір МТП. Отже, вищезазначене свідчить про актуальність теми дисертаційної роботи та доцільність комплексного дослідження фізичних властивостей приладових структур у вигляді мультишарів  $\text{Co/Ni}$  та спін-вентилів і тунельних переходів на їх основі, а також тунельних переходів типу  $\text{Fe/MgO/Fe}$  з ПМА.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі прикладної фізики Сумського державного університету в рамках держбюджетних НДР № 0112U004688 «Вплив структурно-фазового стану на магнітні, магніторезистивні та

електорофізичні властивості плівкових систем на основі Fe(Co)/Gd та Fe(Ni,Co)/Ag(Cu)» (2012 р.) та № 0112U001381 «Електрофізичні і магніторезистивні властивості нанорозмірних плівкових матеріалів із спин-залежним розсіюванням електронів» (2012 - 2014 рр.). Дисертант брав участь у дослідженнях із зазначених НДР як виконавець та під час підготовки звітів. Наукові дослідження на базі лабораторій наукової групи «Наномagnetизму і спінтроніки» Інституту Жана Ламура Університету Лотарингії (м. Нансі, Франція) були проведені згідно з індивідуальним планом дисертанта у рамках державної програми Міністерства освіти і науки України «Навчання студентів і аспірантів та стажування наукових і науково-педагогічних працівників у провідних вищих навчальних закладах та наукових установах за кордоном» та договору між Сумським державним університетом і Університетом Лотарингії в 2012 - 2013 та 2013 - 2014 н.р., а також стипендіальної програми уряду Франції для молодих вчених у 2014 р.

**Мета і задачі досліджень.** Мета дисертаційної роботи полягала в комплексному дослідженні магнітних, магнітооптичних, магніторезистивних та структурних властивостей феромагнітних плівкових сплавів на основі Fe, Ni і Co або Ag, та плівкових систем (спін-вентилі, магнітні тунельні переходи) на основі мультишарів [Co/Ni]<sub>n</sub> з ПМА, а також фізичних властивостей епітаксійних магнітних тунельних переходів типу Fe/MgO/Fe з паралельною та ортогональною (один з електродів характеризується ПМА) орієнтацією осей легкого намагнічування електродів.

Відповідно до поставленої мети, необхідно було вирішити такі задачі:

- дослідити магнітні й магніторезистивні властивості полікристалічних плівкових сплавів на основі Fe, Ni та Co або Ag, а також вплив на них процесу відпалювання;

- встановити товщину Ni, при якій відбувається переорієнтація осей легкого намагнічування плівки Ni з положення паралельно в положення перпендикулярно площині зразка у плівковій системі Co/Ni;

- дослідити магнітні та магніторезистивні властивості, а також їх термозалежність для спін-вентилію на основі мультишарів [Co/Ni]<sub>n</sub>;

- встановити взаємозв'язок між взаємною орієнтацією осей легкого намагнічування електродів та магнітними і магніторезистивними властивостями плівкової структури на основі мультишарів [Co/Ni]<sub>n</sub> та аморфного бар'єру Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>;

- визначити залежність інтерфейсної анізотропії монокристалічних плівок Fe від їх товщини;

- вивчити магнітні та магнітотранспортні властивості тунельних переходів V/Fe/MgO/Fe/Co з паралельною орієнтацією осей легкого намагнічування електродів та їх залежність від температури та напруги зміщення;

- дослідити вплив напруги зміщення на магнітну анізотропію ПМА-електроду в тунельних переходах V/Fe/MgO/Fe/Co з ортогональною взаємною орієнтацією осей легкого намагнічування електродів;

- встановити залежність опору магнітного тунельного переходу V/Fe/MgO/Fe/Co від тривалості дії прикладеної до нього напруги.

**Об'єкт дослідження** – фізичні процеси в тонкоплівкових приладових структурах у вигляді мультишарів, спін-вентилів та магнітних тунельних переходів під дією температури, магнітного та електричного полів.

**Предмет дослідження** – структурні, магнітні та магніторезистивні властивості спін-вентилів на основі мультишарів [Co/Ni]<sub>n</sub> та магнітних тунельних переходів з аморфним (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) або кристалічним (MgO) бар'єром та одним або двома феромагнітними електродами з перпендикулярною магнітною анізотропією.

**Методи дослідження:** формування плівкових структур (тришарові структури, спін-вентилі, магнітні тунельні переходи) пошаровою конденсацією методом магнетронного розпилення та молекулярно-променевої епітаксії (МПЕ); фотолітографія; просвічувальна електронна мікроскопія (ПЕМ); дифракція високоенергетичних електронів (ДБЕЕ); рентгенівська дифрактометрія (XRD); МОКЕ-магнітометрія (вимірювання магнітооптичного ефекту Керра); вібраційна і надпровідна квантова (SQUID) магнітометрія; дво- та чотириточковий методи резистометрії.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Проведені у роботі комплексні експериментальні дослідження плівкових сплавів на основі Fe, Ni та Co або Ag, епітаксійних мультишарових структур на основі ультратонких плівок Co та Ni, а також процесів спін-залежного тунелювання електронів у плівкових системах із ПМА дозволили отримати такі нові результати:

1. Уперше встановлено, що в плівковій системі Co/Ni при товщині плівки Ni 0,6 - 0,8 моноатомного шару відбувається переорієнтація легкої осі намагнічування з положення паралельно в положення перпендикулярно площині зразка, у результаті чого була запропонована методика формування спін-вентильних наноструктур з почерговим перемагнічуванням електродів на основі мультишарів Co/Ni.

2. Уперше одержані та досліджені магнітні тунельні переходи на основі аморфного бар'єру Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> та мультишарів Co/Ni, які характеризуються перпендикулярною магнітною анізотропією. Показано, що їх магнітні та магнітотранспортні властивості визначаються взаємною орієнтацією осей легкого намагнічування електродів при відсутності магнітного поля, зокрема, зміна орієнтації з паралельної на ортогональну приводить до зникнення почергового перемагнічування електродів та зростання поля насичення з 27 мТл до 1,2 Тл.

3. У результаті комплексних досліджень фізичних властивостей епітаксійних тунельних переходів V/Fe/MgO/Fe/Co встановлено, що напруга зміщення, температура, товщина нижнього електроду та інтерфейс V/Fe впливають на магніторезистивні властивості досліджуваних структур. Показано, що при зміні товщини нижнього електроду не спостерігається розмірна залежність величини тунельного магнітоопору, що пов'язано з

проявом ефекту квантової ями на інтерфейсі V/Fe як наслідок енергетичної різниці в зонній структурі ОЦК-Fe та ОЦК-V.

4. Уперше показана можливість керування магнітною анізотропією ультратонкого шару Fe (ПМА-електроду) в плівковій структурі V/Fe(0,7 нм)/MgO/Fe/Co шляхом зміни значення та знаку напруги зміщення, прикладеної до тунельного переходу в інтервалі від -300 до 100 мВ.

5. Уперше показано, що на часову залежність опору при зміні полярності електричного поля, прикладеного до тунельного переходу V/Fe/MgO/Fe/Co, впливають полярність і значення напруги зміщення та температура. Встановлено, що основну роль у зміні опору відіграють взаємодія іонів Fe<sup>+</sup> та O<sup>-</sup> на верхньому інтерфейсі MgO/Fe та дефекти в діелектричному бар'єрі.

**Практичне значення одержаних результатів.** Результати комплексних досліджень тонкоплівкових систем з ПМА, одержаних при виконанні дисертаційної роботи, можуть бути використані при формуванні функціональних елементів магнітних наноелектронних приладів. Уперше сформовані МТП на основі [Co/Ni]<sub>n</sub> і аморфного бар'єру та одержаний для них ТМО, робить ці системи перспективними для використання в пристроях збереження інформації нового покоління. Магнітні тунельні переходи з ортогональною орієнтацією осей легкого намагнічування їх електродів можуть слугувати елементами магнітних сенсорів у широкому діапазоні значень магнітного поля. Можливість контролювати магнітну анізотропію за допомогою електричного поля, що показано на прикладі епітаксійного МТП V/Fe(0,7 нм)/MgO/Fe/Co, відкриває нові шляхи контролю процесу запису в пристроях збереження інформації, що в свою чергу дозволить скоротити енергетичні затрати та час запису.

Фундаментальне значення одержаних результатів полягає в розширенні знань щодо фізичних процесів у спін-вентиліях та магнітних тунельних переходах з перпендикулярною магнітною анізотропією, впливу на них температури, величини та орієнтації магнітного поля, а також ролі наявних в плівковій структурі інтерфейсів у процесі спін-залежного тунелювання електронів.

**Особистий внесок здобувача** полягає в самостійному пошуку й аналізі літературних джерел, проведенні експериментальних досліджень. Автор брав участь в отриманні плівкових зразків, проводив дослідження їх структурно-фазового стану, магнітних, магнітооптичних і магніторезистивних властивостей, здійснював обробку та інтерпретацію одержаних результатів. Постановку задач досліджень та узагальнення експериментальних результатів проведено спільно з науковими керівниками к.ф.-м.н., доц. В. В. Бібіком та доктором наук, асоц. проф. Томасом Хауетом. Частина експериментальних досліджень феромагнітних сплавів була проведена та обговорена з к.ф.-м.н. І. М. Пазухою. Результати досліджень структур з ПМА були обговорені зі співробітниками Інституту Жана Ламура Університету Лотарингії (м. Нансі, Франція) – д. н., проф. М. Еном, д. н. Ф. Монтенем та

д. н., проф. С. Ендрю.

Особисто автором підготовлені тексти статей [2, 5], тези доповідей [7 - 11, 14] та окремі розділи статей [1, 3, 4, 6, 16]. Основні наукові результати доповідалися особисто автором на наукових семінарах та конференціях.

**Апробація результатів дисертації.** Основні наукові та практичні результати роботи оприлюднені та обговорені на таких конференціях: 3-й Міжнародній конференції «Nanomaterials. Application and properties» (Львів, 2014 р.); Міжнародних науково-практичних конференціях «Nanotechnology and nanomaterials» (Буковель, Яремче – Львів, 2013 – 2014 рр.); Міжнародних конференціях студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики «ЄВРИКА» (Львів, 2012 – 2014 рр.); 14-й міжнародній конференції молодих вчених «Optics and High Technology Material Science - SPO 2013» (Київ, 2013 р.); 16-му Міжнародному молодіжному форумі «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке» (Харків, 2012 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте» (Одеса, 2012 р.); 1-й Всеукраїнській науково-технічній конференції «Актуальні проблеми автоматики та приладобудування» (Харків, 2014 р.); Науково-технічних конференціях «Фізика, електроніка, електротехніка» (Суми, 2012 – 2014 рр.).

**Публікації.** Результати дисертації відображені у 18 публікаціях: 1 статті у фаховому виданні України та 5 статтях у закордонних наукових виданнях, які індексуються наукометричною базою даних Scopus, 1 статті та 11 тезах доповідей у матеріалах міжнародних і всеукраїнських конференцій.

**Структура і зміст роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних джерел. Вона викладена на 154 сторінках, з яких 103 сторінки основного тексту, 68 рисунків і 5 таблиць, у тому числі 28 рисунків і 1 таблиця на 18 окремих аркушах. Список використаних джерел нараховує 255 найменувань на 25 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета й основні задачі дослідження, висвітлено наукову новизну і практичне значення одержаних результатів, відмічений зв'язок роботи із науковими темами і програмами, наведена інформація про апробацію одержаних результатів, особистий внесок здобувача і структуру дисертаційної роботи.

У **першому розділі** «Фізичні властивості структур з перпендикулярною магнітною анізотропією та тунельним магніторезистивним ефектом (літературний огляд)» наведений огляд літературних джерел за напрямом досліджень, на основі якого стисло викладені основні відомості щодо особливостей кристалічної структури та фізичних властивостей плівкових

систем, які характеризуються перпендикулярною магнітною анізотропією, а також результатів теоретичних та експериментальних досліджень магнітних тунельних переходів. Зокрема, розглянуто види магнітної анізотропії в тонких плівках та причини її виникнення, а також наведено дані про умови одержання плівкових систем з перпендикулярною магнітною анізотропією та їх фізичні властивості. Більш докладно розглянуто мультишари Co/Ni та спін-вентилі на їх основі. Відзначено особливу роль кристалічної структури та якості інтерфейсів при формуванні плівкових систем з ПМА. Проведено аналіз теоретичних і експериментальних результатів досліджень процесу спін-залежного тунелювання електронів в плівкових системах на основі феромагнетиків та аморфного або кристалічного бар'єру. Зауважено, що МТП з кристалічним бар'єром MgO характеризуються значно вищим тунельним магнітоопором, ніж МТП з аморфним бар'єром, окрім цього МТП типу Fe/MgO/Fe є модельною системою для дослідження процесів і явищ, пов'язаних зі спін-залежним тунелюванням електронів. На основі літературного огляду встановлено, що фізичні процеси в мультишарах, спін-вентиліях та тунельних переходах, які характеризуються ПМА є мало вивченими, тому дисертаційна робота спрямована на розширення знань про ці структури з точки зору їх перспективного практичного використання.

**У другому розділі** «Методика і техніка експерименту» описані методи та умови одержання зразків, дослідження кристалічної структури та фазового складу, магнітних, магнітооптичних та магніторезистивних властивостей плівкових систем. Для пошарової конденсації плівкових зразків було використано два методи: магнетронне розпилення та МПЕ. Зокрема, метод МПЕ було застосовано для одержання монокристалічних плівкових систем з метою дослідження ПМА П / Co / Ni ( $d$ ) / Co та П / V / Fe ( $d$ ) / V (MgO) (де: П – підкладка з буферним шаром;  $d$  – змінна товщина клиноподібного шару), спін-вентильних структур П/[Co/Ni]<sub>n</sub>/Au/[Co/Ni]<sub>n</sub>, а також магнітних тунельних переходів П/V/Fe/MgO/Fe/Co. Магнітні тунельні переходи на основі мультишарів Co/Ni та аморфного бар'єру Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> формувались методом магнетронного розпилення. Для реалізації геометрії вимірювання магнітоопору МТП, при якій струм протікав перпендикулярно площині зразка, застосовувалась фотолітографія. Дослідження кристалічної структури та фазового складу проводились із використанням методів рентгенівської дифрактометрії та дифракції високоенергетичних електронів, останній з яких дозволяє контролювати швидкість конденсації та товщину шарів у процесі МПЕ. Вивчення магнітооптичних властивостей плівкової системи П / Co / Ni ( $d$ ) / Co з клиноподібним шаром Ni ( $d$ ) проводилося у перпендикулярній геометрії вимірювання (магнітне поле перпендикулярне площині зразка та паралельне площині падіння та відбиття променю).

Вимірювання магнітоопору, вольт-амперних характеристик та часової залежності опору МТП проводились за допомогою системи PPMS Quantum Design. Залежно від типу досліджуваної плівкової системи



використовувалась паралельна або перпендикулярна геометрії протікання струму відносно площини зразка з чотири- або двоточковою схемою вимірювання при перпендикулярній чи паралельній орієнтації магнітного поля. Розрахунок магнітоопору проводився за співвідношенням:

$$MO = \Delta R/R_S = ((R(B) - R_S)/R_S) \cdot 100\%, \quad (1)$$

де  $R(B)$  і  $R_S$  – опір плівки при заданому полі та полі насичення відповідно.

Вивчення магнітних властивостей проводилося із використанням методів вібраційної (VSM), градієнту змінного поля (AGFM) та надпровідної квантової (SQUID) магнітометрії при різних кутах орієнтації зразків відносно прикладеного зовнішнього магнітного поля.

**Третій розділ** «Спін-вентильні структури та магнітні тунельні переходи на основі мультишарів Co/Ni з перпендикулярною магнітною анізотропією» складається з п'яти підрозділів.

У *першому підрозділі* наведені експериментальні результати досліджень плівкових феромагнітних сплавів на основі Fe, Ni та Co або Ag, одержаних методом терморезистивного випаровування з подальшою термообробкою до  $T_b = 700 - 900$  К. Три типи зразків одношарових плівок товщиною 35 - 40 нм мали наступний склад в ат. %: тип А -  $c_{Ni} = 80$ ,  $c_{Fe} = 20$ ; тип Б -  $c_{Ni} = 40$ ,  $c_{Fe} = 10$  та  $c_{Co} = 50$ ; тип С -  $c_{Ni} = 40$ ,  $c_{Fe} = 10$  та  $c_{Ag} = 50$ . Всі зразки характеризувалися полікристалічною структурою. Дослідження магніторезистивних властивостей тонкоплівкових сплавів показали, що їх магнітоопір має анізотропний характер зі значення 0,06 - 0,45% у залежності від геометрії вимірювання, температури відпалювання та складу зразка. Відсутність поля насичення магнітоопору при перпендикулярно прикладеному магнітному полі свідчить про наявність важкої осі перемагнічування в цій геометрії, що узгоджується з результатами дослідження магнітних властивостей. Магнітний гістерезис для досліджуваних плівкових сплавів типу А, Б та В має типовий характер для зразків з орієнтацією намагніченості паралельно площині зразка, що свідчить про домінування енергії анізотропії форми ( $K_f$ ) над магнітокристалічною ( $K_u$ ) та інтерфейсною ( $K_i$ ).

У *другому підрозділі* проведено аналіз результатів рентгенографічного дослідження кристалічної структури епітаксійних мультишарів [Co/Ni]<sub>n</sub>, згідно з яким внаслідок виникнення напружень відбувається деформація параметру кристалічної ґратки як Co, так і Ni. Встановлено, що мультишарова структура [Co/Ni]<sub>75</sub> характеризується параметром ґратки паралельно площині зразка  $a_{\parallel}^{Co/Ni} = 0,354$  нм та параметрами Co і Ni перпендикулярними площині -  $a_{\perp}^{Ni} = 0,351$  нм та  $a_{\perp}^{Co} = 0,356$  нм відповідно.

У *третьому підрозділі* проаналізовано результати експериментального дослідження магнітооптичних властивостей епітаксійної плівкової системи П / Ni (0,6 нм) / Co (0,6 нм) / Ni ( $d$ ) / MgO (2,5 нм) з клиноподібним шаром Ni товщиною 0 - 1,2 моноатомних шарів (МШ). За допомогою МОКЕ-

магнітометрії в перпендикулярній геометрії було встановлено, що переорієнтація легкої осі намагнічування з паралельної до площини зразка в перпендикулярну спостерігається між 0,6 та 0,8 МШ Ні (рис.1) у зв'язку з впливом на магнітну анізотропію електронної гібридації на інтерфейсах Co/Ni, внаслідок чого в плівковій системі формується ПМА, що свідчить про вирішальну роль інтерфейсів Co/Ni в магнітній анізотропії.

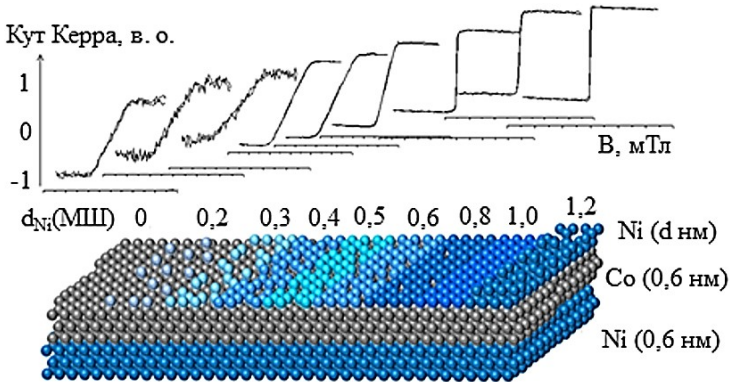


Рис. 1. Схематичне зображення клиноподібного шару Ni ( $d$ ) та МОКЕ-залежності для змінної  $d_{Ni}$  при перпендикулярній геометрії вимірювання

У четвертому підпункті розглянуті магнітні та магніторезистивні властивості спін-вентилів  $\Pi/[Co/Ni]_n/Au/[Co/Ni]_n$  з перпендикулярною магнітною анізотропією, сформованих на основі результатів дослідження ПМА в плівкових структурах Co/Ni та літературних даних. Магнітний гістерезис для спін-вентилю  $Al_2O_3(\Pi) / V(5 \text{ нм}) / Au(3 \text{ МШ}) / [Ni(3 \text{ МШ}) / Co(1 \text{ МШ})]_5 / Au(4 \text{ нм}) / [Ni(3 \text{ МШ}) / Co(2,5 \text{ МШ})]_3 / Au(2 \text{ нм})$  при прикладенні магнітного поля перпендикулярно поверхні зразка є типовим для плівкової структури з перпендикулярною магнітною анізотропією (рис. 2.).

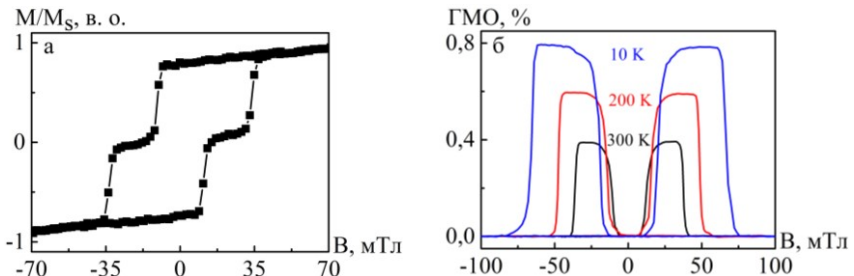


Рис. 2. Нормована намагніченість (а) та ГМО при  $T = 300, 200$  і  $10 \text{ K}$  (б) для спін-вентильної системи  $Al_2O_3(\Pi)/V/Au/[Ni/Co]_5/Au/[Ni/Co]_3/Au$  при перпендикулярно прикладеному магнітному полі

Наявність сходинки на магнітному гістерезисі свідчить про почергове незалежне перемагнічування магнітом'якого та жорсткого шарів та відсутність обмінної взаємодії через проміжний шар Au (4 нм). Встановлено, що магнітом'яким з коерцитивністю  $B_C = 13$  мТл є верхній електрод спін-вентилію з плівковим складом  $[\text{Ni} (3 \text{ МШ}) / \text{Co} (2,5 \text{ МШ})]_3$ . Відносно низьке значення ГМО (0,39 – 0,81% в інтервалі температур 300 - 10 К) може бути пояснене зростанням ефекту шунтування проміжним шаром Au (4 нм) з віддаленням від поверхні зразка та зменшенням ймовірності проходження спін-поляризованих електронів через шар Au без розсіювання.

У *п'ятюму підпункті* наведені результати досліджень магнітних тунельних переходів на основі мультишарів  $[\text{Co}/\text{Ni}]_n$  та  $[\text{Co}/\text{Pt}]_n$  з перпендикулярною магнітною анізотропією. Було досліджено два типи МТП з різними верхніми електродами, у той час як нижній електрод був аналогічний в обох випадках (в дужках зазначено товщину в нанометрах):  $\text{Pt}/\text{Pt}(10)/\text{Co}(0,6)/[\text{Ni}(0,6)/\text{Co}(0,3)]_3/\text{Al}_2\text{O}_3(2,5)/[\text{Co}(0,2)/\text{Ni}(0,6)]_3/\text{Pt}(1)/[\text{Co}(0,6)/\text{Pt}(1)]_3$  – зразок А;  $\text{Pt}/\text{Pt}(10)/\text{Co}(0,6)/[\text{Ni}(0,6)/\text{Co}(0,3)]_3/\text{Al}_2\text{O}_3(2,5)/[\text{Co}(0,2)/\text{Ni}(0,6)]_3/\text{Pt}(2)/[\text{Co}(0,6)/\text{Pt}(1)]_3$  – зразок Б;  $\text{Pt}/\text{Pt}(10)/\text{Co}(0,6)/[\text{Ni}(0,6)/\text{Co}(0,3)]_3/\text{Al}_2\text{O}_3(2,5)/\text{Co}(15)$  – зразок В. Структура зразків А та Б є ідентичною, окрім товщини проміжного шару Pt між мультишарами  $[\text{Co}/\text{Ni}]_n$  та  $[\text{Co}/\text{Pt}]_n$  у верхньому електроді, яка становить 1 та 2 нм відповідно. Для зразка Б гістерезис характеризується повною залишковою намагніченістю та двома сходинками при полі перемагнічування 13 та 27 мТл відповідно (рис. 3 а).

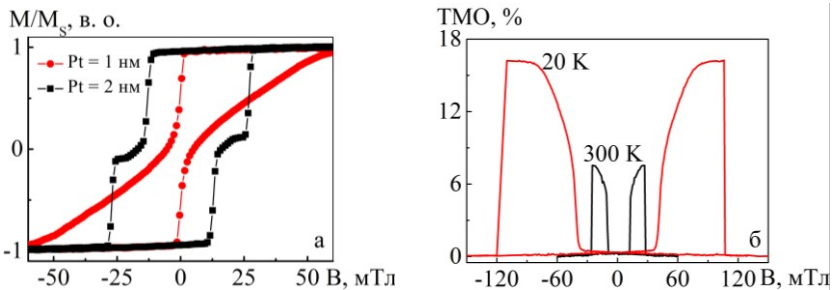


Рис. 3. Нормований гістерезис  $M/M_S$  для магнітних тунельних переходів А ( $\text{Pt} = 1$  нм) та Б ( $\text{Pt} = 2$  нм) (а) і ТМО для зразка Б з двома ПМА-електродами, виміряного при  $U = 50$  мВ та  $T = 300$  і  $20$  К (б) при прикладенні магнітного поля перпендикулярно площині зразка

Перший стрибок намагніченості має значно більшу амплітуду, ніж другий. Це свідчить, що верхній електрод  $[\text{Co}(0,2)/\text{Ni}(0,6)]_3/\text{Pt}(2)/[\text{Co}(0,6)/\text{Pt}(1)]_3$ , який має більший сумарний магнітний момент, є магнітом'якшим у порівнянні з нижнім електродом  $\text{Pt}(10)/\text{Co}(0,6)/[\text{Ni}(0,6)/\text{Co}(0,3)]_3$ . Наявність так званого «хвоста» при першому магнітному переключенні є типовою дипольною взаємодією (або розмагнічувальним полем) у плівках товщиною

більше декількох нанометрів із ПМА, але досягнення повного антипаралельного стану відбувається перед перемагнічуванням нижнього електрода.

Незначне зменшення товщини проміжного шару Pt між мультишарами  $[\text{Co/Ni}]_n$  та  $[\text{Co/Pt}]_n$  у верхньому електроді з 2 нм до 1 нм призвело до суттєвої зміни форми петлі гістерезису та зникнення сходинки, що характеризує антиферомагнітне намагнічування електродів. Той факт, що обидва електроди перемагнічуються разом, пов'язаний із дипольною взаємодією, яка ефективно зв'язує два шари. МТП із двома ПМА-електродами на основі мультишарів Co/Ni (зразок Б) характеризувався досить високим значенням ТМО, яке складало 8 % при 300 К та 16 % при 20 К та напрузі зміщення 50 мВ (рис. 3 б). Термозалежність ТМО пояснюється зниженням спінополіризації та зростанням непружних процесів із підвищенням температури.

Експериментально одержана ВАХ тунельного переходу була порівняна з кривою, теоретично розрахованою за моделлю Брінкмана з використанням товщини бар'єру 2,5 нм. Одержана висота бар'єру 1,8 еВ свідчить про середню якість діелектричного бар'єрного шару  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Оскільки при наближенні Брінкмана не враховувалась асиметрія електродів МТП, а ВАХ та залежність ТМО від напруги зміщення є майже симетричними відносно нуля, то даний факт свідчить про відносну ідентичність верхнього й нижнього інтерфейсів. Відсутність асиметричності  $I(U)$  та ТМО ( $U$ ) при різному плівковому складі електродів, більш за все, є наслідком дифузійних процесів, які суттєво вплинули на магнітотранспортні властивості МТП. Також дифузії могли сприяти нерівності на інтерфейсах та структурні дефекти в шарах, що виникли в результаті процесу початкового острівцевого росту верхнього електрода на аморфному оксидному шарі  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Для зразка В з ортогональної орієнтації спонтанної намагніченості електродів магніторезистивна залежність (рис. 4) суттєво відрізняється від ТМО ( $\vec{V}$ ) для зразка Б. Для зразка В намагніченість обох електродів орієнтується вздовж прикладеного поля (перпендикулярно чи паралельно) при досить високих його значеннях.

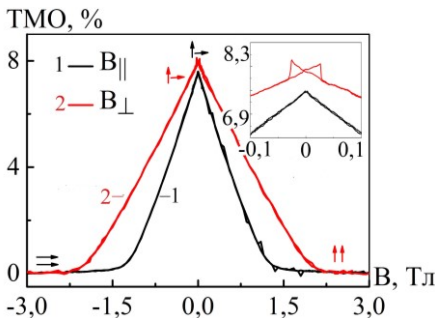


Рис. 4. Залежність тунельного магнітоопору від перпендикулярно ( $B_{\perp}$ ) та паралельно ( $B_{\parallel}$ ) прикладеного магнітного поля при температурі 300 К для МТП типу В. На вставці наведено збільшену частину залежності ТМО ( $V$ ) в області низького магнітного поля

При відсутності магнітного поля ( $\vec{L} = 0$ ) магнітний момент Co/Ni-мультишарів орієнтований перпендикулярно площині зразка, тоді як момент Co – паралельно. При прикладенні магнітного поля перпендикулярно площині зразка гістерезис спостерігається для нижнього ПМА-електроду на основі мультишарів Co/Ni. У випадку паралельної орієнтації магнітного поля гістерезис відбувається для верхнього електроду з Co товщиною 15 нм. Отримане значення ТМО при ортогональній магнітній конфігурації складало 8 % при 300 К. Проте, реальне значення ТМО мало б визначатись як різниця між паралельним станом намагніченості електродів та гіпотетичним антипаралельним і мало б значення 16 %. Отже, теоретично зразок В характеризується в два рази більшим ТМО, ніж зразок Б. Із огляду на те, що якість нижнього електроду та бар'єру однакова для зразків Б та В, то ймовірним є перемішування в мультишарах Co/Ni верхнього електроду, що призвело до нижчої спін-поляризації та ПМА в порівнянні зі структурами з якісними інтерфейсами.

**Четвертий розділ** «Магнітні та магніторезистивні властивості тунельних переходів V/Fe/MgO/Fe/Co з перпендикулярною анізотропією» складається із трьох підрозділів. У *першому підрозділі* розглянуті результати дослідження інтерфейсної анізотропії в епітаксійних плівкових структурах V(20 нм)/Fe( $d$ )/V(5 нм) з товщиною Fe від 0,7 нм (5 МШ) до 5 нм (35 МШ) та V/Fe( $d$ )/MgO з товщиною Fe 5 - 7 моноатомних шарів (0,7 – 0,98 нм) із кроком 1 МШ ( $d_{1 \text{ МШ Fe}} = 0,14$  нм). Результати магнітометрії в інтервалі всіх досліджуваних товщин Fe в структурах V(20 нм)/Fe( $d$ )/V(5 нм) свідчать про орієнтацію важкої осі перемагнічування перпендикулярно площині зразка. Вимірювання намагніченості при прикладенні магнітного поля вздовж кристалографічного напрямку Fe (100) (паралельно площині) характеризується прямокутним гістерезисом з повною намагніченістю  $M_S$

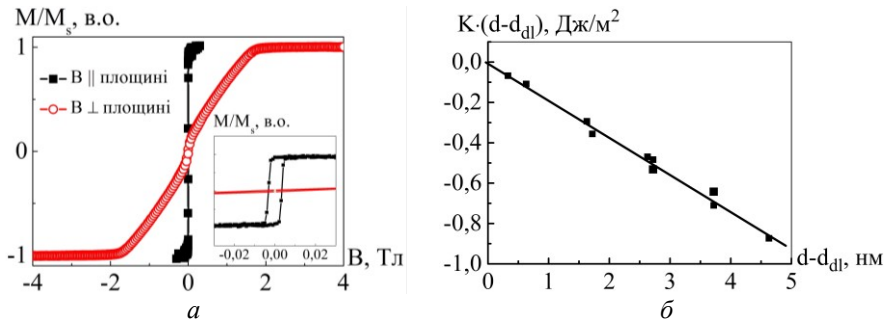


Рис. 5.  $M/M_S$  при прикладенні поля паралельно та перпендикулярно площині зразка для системи П/V(20 нм)/Fe(2 нм)/V(5 нм) і збільшена частина залежностей в області малих полів (а). Залежність енергії ефективної анізотропії  $K_{\text{ef}}(d - d_{dl})$  від товщини шару Fe ( $d - d_{dl}$ ) при  $T = 300$  К (б)

при  $B = 0$  Тл (рис. 5 а).

Розрахована на основі результатів магнітометрії розмірна залежність енергії ефективної анізотропії  $K_{ef}$  плівок Fe має лише від'ємні значення, що підтверджує орієнтацію намагніченості в площині зразка для всього досліджуваного інтервалу товщин Fe (рис. 5 б). Провівши аналіз одержаних результатів було зроблено висновок, що внесок магнітокристалічної анізотропії в  $K_{ef}$  є відносно малим у порівнянні зі значенням анізотропії форми, а інтерфейсна анізотропія буде близькою до нуля. На відміну від системи V/Fe( $d$ )/V, для зразка V/Fe( $d$ )/MgO з  $d_{Fe} = 0,7$  нм спостерігається прямокутний гістерезис при перпендикулярно прикладеному магнітному полі  $B$ , що свідчить про наявність ПМА в тонкоплівковій системі. Зі зростанням товщини шару Fe з 0,7 до 0,98 нм відбувається перехід орієнтації спонтанної намагніченості від перпендикулярної до паралельної. Наявність ПМА в даній плівковій структурі в основному пов'язана з сильною гібридизацією орбіталей Fe-3d та O-2p в поєднанні зі спин-орбітальним моментом на інтерфейсі Fe/MgO.

У другому підрозділі наведені результати дослідження електричних ( $I(U)$ ,  $dI/dU$ ) та магніторезистивних (ТМО, ТМО( $T$ ), ТМО( $U$ ), ТМО( $d_{Fe}$ ) та ін.) властивостей епітаксійних МТП V(5 нм)/Fe( $d$  нм)/MgO(1,2 нм)/Fe(5 нм)/Co(5 нм), де  $d$  становило 2 – 10 нм, з паралельною орієнтацією спонтанної намагніченості електродів. Ефект ТМО в МТП досягається реалізацією паралельного (П) та антипаралельного (АП) стану намагніченості електродів з різною коерцитивністю (рис.6 а).

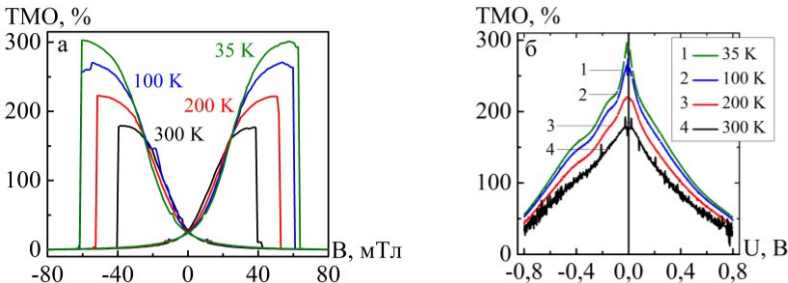


Рис. 6. ТМО при  $U = 10$  мВ (а) та залежність ТМО від напруги зміщення (б) для МТП П/V(5 нм)/Fe(3 нм)/MgO(1,2 нм)/Fe(5 нм)/Co(5 нм) розміром  $50 \times 50$  мкм<sup>2</sup> при паралельно прикладеному магнітному полі та температурі вимірювання 300, 200, 100 та 35 К

При зміні температури в інтервалі 300 – 35 К відбувається зростання значення ТМО з 180 до 302 %, що є типовим прикладом температурної залежності магнітоопору. Зниження температури призводить до зростання інтерфейсної намагніченості та тунельної спин-поляризації, що пов'язано зі збудженням спинових хвиль. Відсутність різкого перемагнічування для

нижнього електроду Fe (3 нм) може пояснюватись розупорядкуванням на інтерфейсах, у тому числі наявністю атомів кисню на поверхні буферного шару V при осадженні наступних шарів та дефектами кристалічної ґратки, що впливатиме на рухливість доменних стінок і таким чином на процес перемагнічування електроду. Залежність ТМО ( $U$ ) має симетричний характер відносно нуля напруги зміщення при температурі 300 К (рис. 6 б). Проте, зі зниженням  $T$  у зоні від'ємних напруг, коли тунелювання електронів відбувається в напрямку нижнього електроду з Fe (3 нм), спостерігається деяке коливання значення магнітоопору, на відміну від монотонного спадання залежності при додатній напрузі – тунелювання електронів відбувається в напрямку верхнього електроду Fe (5 нм)/Co (5 нм).

Подальший аналіз магнітотранспортних властивостей МТП показав симетричність ВАХ як у паралельному (П), так і антипаралельному (АП) станах (рис. 7 а) намагніченості електродів при температурі 300 та 35 К. Симетричність залежності  $I(U)$  свідчить про відносну ідентичність верхнього (MgO/Fe) та нижнього (Fe/MgO) інтерфейсів та однакову локальну густину станів в електродах МТП, незважаючи на їх різний плівковий склад. Однак, одержана з ВАХ диференціальна провідність  $dI/dU$  для П та АП станів намагніченості електродів (рис. 7 б), яка відповідає густині станів незаповнених рівнів позитивного електроду МТП, має несиметричний характер у П стані, причому дана несиметричність зростає зі зниженням  $T$ , що також відобразилось на залежності ТМО ( $U$ ).

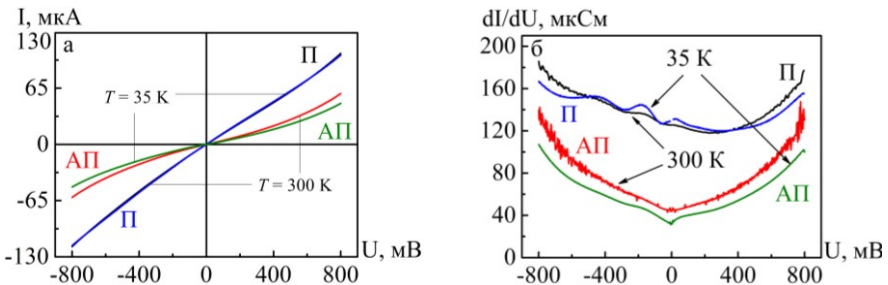


Рис. 7. ВАХ в паралельному (П) та антипаралельному (АП) станах намагніченості електродів при прикладенні магнітного поля в площині зразка та температурі вимірювання 300 і 35 К (а) та диференціальна провідність  $dI/dU$  (б) для П/V(5 нм)/Fe(3 нм)/MgO(1,2 нм)/Fe(5 нм)/Co(5 нм)

Явище осциляції провідності МТП зі зміною  $U$  виникає внаслідок спин-залежного ефекту квантової ями, який спостерігається в епітаксійних МТП-системах, коли один з електродів має відносно малу товщину (декілька моноатомних шарів). Утворення станів квантової ями в МТП відбувається через значну енергетичну різницю в зонній структурі ОЦК-Fe та ОЦК-V в напрямку, які утворюють інтерфейс V/Fe в нижньому електроді, що виконує



роль другого потенціального бар'єру для електронів провідності.

У третьому підрозділі проведено аналіз результатів дослідження властивостей МТП П/V(5 нм)/Fe(0,7 нм)/MgO(1,2 нм)/Fe(5 нм)/Co(5 нм), в якому нижній електрод характеризувався ПМА, що підтверджувалося результатами магнітометрії та резистометрії. З метою дослідження впливу  $U$  на магнітну анізотропію ПМА-електроду вимірювання ТМО (рис. 8) проводилось при різних значеннях і полярності  $U$  та паралельно прикладеному магнітному полю, що відповідало легкому напрямку перемагнічування для верхнього електроду MgO/Fe(5 нм)/Co(5 нм) та важкому напрямку – для нижнього V(5 нм)/Fe(0,7 нм)/MgO.

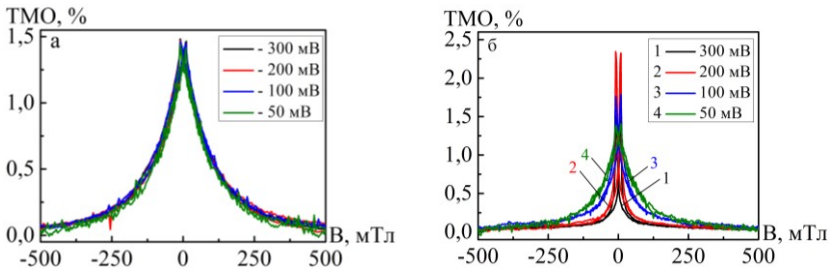


Рис. 8. ТМО при паралельно прикладеному магнітному полі для  $U = \pm 300$ ;  $\pm 200$ ;  $\pm 100$ ;  $\pm 50$  мВ при негативній (а) та позитивній (б) полярності, отриманий при 300 К для V(5 нм)/Fe(0,7 нм)/MgO(1,2 нм)/Fe(5 нм)/Co(5 нм)

Залежності ТМО ( $B$ ) для позитивної (тунелювання електронів відбувається в нижній електрод) й негативної напруги мають різний характер, що є очікуваним у випадку використання електродів різного складу. Використавши експериментальні значення поля анізотропії  $B_K$  та намагніченості насиченням  $M_S$ , враховуючи ефективну товщину шару Fe = 0,4 нм, та визначивши ефективну анізотропії зі співвідношення  $B_K = 2K_{ef}/M_S$ , було розраховано інтерфейсну анізотропію  $K_i$  (рис. 9) в інтервалі напруги зміщення від 100 до -300 мВ за наступною формулою:

$$K_i = (K_{ef} + 2\pi M_S^2) \cdot d. \quad (2)$$

При негативних значеннях  $U$  енергія інтерфейсної анізотропії  $K_i$  залишається незмінною зі значенням близько 82 мкДж/м<sup>2</sup>. При переключенні полярності на протилежну, починаючи з 50 мВ, відбувається зменшення  $K_i$ , що свідчить про вплив спін-поляризованого тунельного струму на магнітну анізотропію шару Fe (0,7 нм).

При прикладенні напруги до МТП при вимірюванні ТМО спостерігалась нестабільність опору: тривале монотонне його зниження або зростання. У залежності від значення напруги зміщення стабілізація опору  $R$  відбувалась



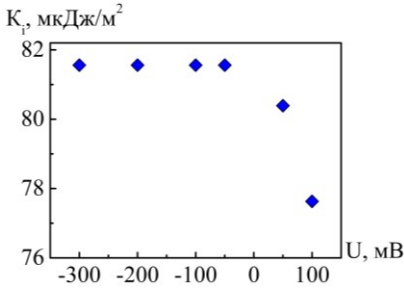


Рис. 9. Залежність енергії інтерфейсної анізотропії  $K_i$  від напруги зміщення  $U$ , прикладеної до магнітного тунельного переходу  $V$  (5 нм) /  $Fe$  (0,7 нм) /  $MgO$  (1,2 нм) /  $Fe$  (5 нм) /  $Co$  (5 нм)

протягом часу  $t$ , який складав від декількох хвилин до декількох годин. Цей процес мав повторюваний та зворотний характер (рис. 10 а). Опір магнітного тунельного переходу коливався в межах 70,5 – 90 Ом, причому залежність  $R(t)$  мала різний характер при збільшенні значення напруги зміщення  $U$ . Порівнявши залежності  $R(t)$  для окремо взятих позитивних або негативних значень напруги (рис. 10 б), зміну опору можна поділити на дві стадії: миттєвий стрибок при переключенні полярності та подальша повільна стабілізація. Позитивна напруга зміщення відповідає позитивно зарядженому нижньому електроду МТП, тобто коли тунелювання електронів відбувається в нижній шар  $Fe$  (0,7 нм).

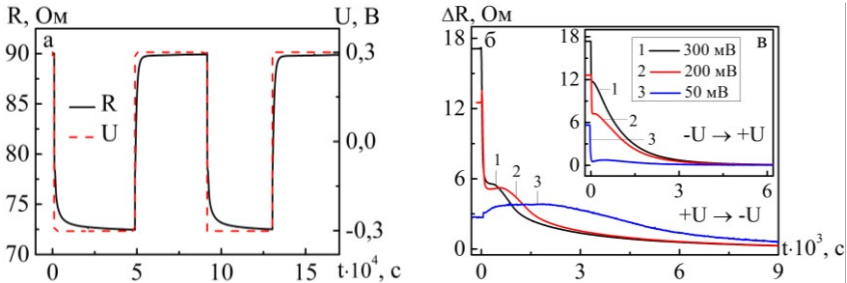


Рис. 10. Часова залежність опору  $R(t)$  для напруги зміщення  $U = \pm 300$  мВ та залежності  $\Delta R(t)$  при зміні полярності напруги з позитивної на негативну ( $+U \rightarrow -U$ ) (б) і навпаки ( $-U \rightarrow +U$ ) (в)

Початковий стрибок  $R$  має пряму залежність від величини та полярності напруги зміщення, причому при переході з  $-U$  на  $+U$  зберігає своє значення для інтервалу напруги 50 – 300 мВ, а при протилежній полярності  $U$  має змінний характер (зростає зі зростанням  $U$ ), що пов'язано з різними верхнім і нижнім інтерфейсами електрод/бар'єр. Час стабілізації опору МТП складав декілька годин. При нормуванні залежностей  $\Delta R(t)$  було встановлено, що опір мав однакову поведінку незалежно від полярності: при зростанні  $U$  від 50 мВ до 300 мВ час, необхідний для стабілізації  $R$ , зменшується. Результат дослідження часової залежності опору МТП в інтервалі температури 300 –

350 К (рис. 11 а) свідчить про термозалежність процесу, який описується потенціальним бар'єром висотою  $U = 0,22$  еВ (рис. 11 б).

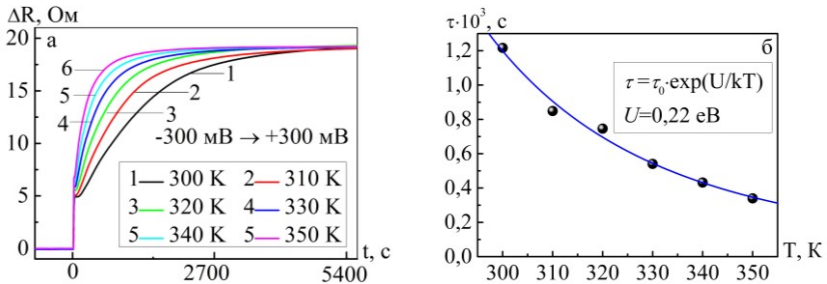


Рис. 11. Часова залежність опору після зміни полярності напруги  $U$  з -300 мВ на +300 мВ при прикладенні паралельного магнітного поля величиною 400 мТл в інтервалі температури 300 – 350 К (а) та розрахована температурна залежність часу релаксації  $\tau$  (б)

Описана поведінка опору може пояснюватися дефектністю діелектричного бар'єру, а також наявністю некомпенсованого заряду та електроміграційних процесів в бар'єрі. Окрім цього, встановлено, що зміна зв'язків Fe-O на нижньому інтерфейсі електрод/бар'єр не є причиною повільної зміни опору після зміни полярності  $U$ , так як не змінюється анізотропія електроду з ПМА. Таким чином, зміна опору виникає внаслідок процесів, які відбуваються або на верхньому інтерфейсі MgO/Fe, або всередині об'єму MgO.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі проведених комплексних досліджень фізичних властивостей приладових тонкоплівкових систем у вигляді епітаксійних мультишарів  $[\text{Co/Ni}]_n$  з ПМА та спіні-вентилів і магнітних тунельних переходів на їх основі, а також монокристалічних МТП типу Fe/MgO/Fe з паралельною та ортогональною орієнтацією осей легкого намагнічування їх електродів, встановлена можливість використання їх у якості функціональних елементів магнітних датчиків положення або енергозберігаючих пристроїв запису та збереження інформації.

Аналіз результатів, одержаних у ході виконання роботи, дозволяє зробити наступні узагальнюючі висновки:

1. Дослідження структурно-фазового стану епітаксійних мультишарів  $[\text{Co/Ni}]_n$  методом рентгенівської дифрактометрії дозволили визначити параметри кристалічної ґратки в площині зразка  $[\text{Co/Ni}]_n$  та перпендикулярно до неї, які становили  $a_{\parallel}^{\text{Co/Ni}} = 0,354$  нм та  $a_{\perp}^{\text{Ni}} = 0,351$  нм і  $a_{\perp}^{\text{Co}} = 0,356$  нм, відповідно, а також встановити, що параметри ґратки зазнають змін при

орієнтованому епітаксійному рості ультратонких шарів Co та Ni.

2. На основі результатів досліджень магнітних і магніторезистивних властивостей спін-вентиллю  $\text{P}[\text{Ni}(3 \text{ МШ})/\text{Co}(1 \text{ МШ})]_5/\text{Au}(4 \text{ нм})/[\text{Ni}(3 \text{ МШ})/\text{Co}(2,5 \text{ МШ})]_3$  встановлено, що:

- спін-вентильна структура з товщиною шарів Co 1 - 2,5 МШ та Ni 3 МШ характеризується ПМА та почерговим перемагнічуванням верхнього і нижнього електродів при 13 і 31 мТл, відповідно, що свідчить про реалізацію механізму спін-залежного розсіювання електронів;

- в інтервалі температур вимірювання 10 - 300 К значення ГМО зростає з 0,39 до 0,81 % при зниженні температури. Крім цього, зниження температури приводить до зростання поля насичення, відносна зміна якого в інтервалі 10 - 300 К складає 115 %, що може бути умовою їх використання як елементів чутливих елементів сенсорів температури.

3. На основі результатів дослідження магнітних та магніторезистивних властивостей вперше одержаних тунельних переходів на основі мультишарів  $[\text{Co}/\text{Ni}]_n$  та аморфного бар'єру  $\text{Al}_2\text{O}_3$  з одним або двома ПМА-електродами показана можливість їх використання як елементів високочутливих сенсорів магнітного поля та елементарні комірки пам'яті, і встановлено наступне:

- при перпендикулярно прикладеному магнітному полі на гістерезисі для системи  $\text{P}/\text{Pt}(10)/\text{Co}(0,6)/[\text{Ni}(0,6)/\text{Co}(0,3)]_3/\text{Al}_2\text{O}_3(2,5)/[\text{Co}(0,2)/\text{Ni}(0,6)]_3/\text{Pt}(2)/[\text{Co}(0,6)/\text{Pt}(1)]_3$  спостерігається петля з повною залишковою намагніченістю та двома її стрибками при значеннях поля 13 і 27 мТл відповідно. Зменшення товщини проміжного шару Pt з 2 до 1 нм у верхньому електроді призводить до зникнення антипаралельного намагнічування електродів внаслідок їх дипольної взаємодії, що свідчить про можливість контролювати магнітні властивості плівкової системи шляхом зміни шару Pt;

- відсутність асиметричності залежності ТМО ( $U$ ) для МТП з різними за складом електродами свідчить про ідентичність їх магнітних властивостей внаслідок впливу, дифузійних процесів, шорсткості інтерфейсів та структурних дефектів у шарах, що знижує ПМА;

- тунельний магнітоопір при ортогональній конфігурації МТП  $\text{P}/\text{Pt}(10)/\text{Co}(0,6)/[\text{Ni}(0,6)/\text{Co}(0,3)]_3/\text{Al}_2\text{O}_3(2,5)/\text{Co}(15)$  має, незалежно від орієнтації магнітного поля, майже однакове значення  $\sim 8$  %, що відповідає 16 % ТМО між паралельним та гіпотетичним антипаралельним станами намагніченості електродів. Ці результати опосередковано свідчать про зниження спін-поляризації внаслідок недосконалості кристалічної структури саме верхніх мультишарів МТП з двома ПМА-електродами.

4. При дослідженні розмірної залежності магнітних властивостей плівок Fe у тришаровій монокристалічній структурі  $\text{MgO}(\text{П})/\text{V}/\text{Fe}(d)/\text{V}$  встановлено, що на нижньому інтерфейсі V/Fe формується неферомагнітний шар Fe товщиною 0,3 нм. В інтервалі досліджених товщин 0,7 – 5 нм спостерігається домінування магнітокристалічної анізотропії та анізотропії форми, що орієнтує спонтанну намагніченість Fe паралельно площині, в той

час як значення інтерфейсної анізотропії близьке до нуля.

5. Встановлено, що для магнітного тунельного переходу  $V(5 \text{ нм})/Fe(d \text{ нм})/MgO(1,2 \text{ нм})/Fe(5 \text{ нм})/Co(5 \text{ нм})$  зі змінною товщиною  $d$  нижнього електроду 2 - 10 нм не спостерігається чітка розмірна залежність величини ТМО, яка коливається в межах 100 - 150 %, що пов'язано з проявом ефекту квантової ями на інтерфейсі  $V/Fe$  як наслідок значної енергетичної різниці в зонній структурі ОЦК- $Fe$  та ОЦК- $V$ .

6. При зміні полярності напруги, прикладеної до МТП  $V(5 \text{ нм})/Fe(0,7 \text{ нм})/MgO(1,2 \text{ нм})/Fe(5 \text{ нм})/Co(5 \text{ нм})$  з нижнім ПМА-електродом, з позитивної на негативну та навпаки, спостерігається двоступенева зміна опору: різкий стрибок та повільна його стабілізація. Даний процес зміни опору з тривалістю дії напруги залежить від її величини і температури, причому підвищення обох прискорює процес стабілізації, що свідчить про наявність енергетичного бар'єру висотою 0,2 еВ. Незмінна магнітна поведінка тунельного переходу вказує на незалежність зміни опору від магнітної анізотропії ПМА-електроду, яка виникає внаслідок формування зв'язків  $Fe-O$  на нижньому інтерфейсі, а отже основну роль відіграють взаємодія іонів  $Fe^+$  та  $O^-$  на верхньому інтерфейсі  $MgO/Fe$  та дефекти в діелектричному бар'єрі.

7. Дослідження епітаксійних магнітних тунельних переходів  $V(5 \text{ нм})/Fe(0,7 \text{ нм})/MgO(1,2 \text{ нм})/Fe(5 \text{ нм})/Co(5 \text{ нм})$  дозволили встановити, що зміна полярності та значення напруги зміщення дає можливість впливати на перпендикулярну магнітну анізотропію нижнього електроду з  $Fe(0,7 \text{ нм})$ , яка знижується при зростанні позитивної прикладеної напруги та залишається незмінною при негативній. Зміна магнітних властивостей під дією спінополяризованого струму (перенесення спінового моменту) відкриває нові шляхи контролю процесу запису в пристроях збереження інформації, що в свою чергу дозволить скоротити енергетичні затрати та час запису.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### 1. Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати

1. Magnetic tunnel junctions with perpendicular anisotropy  $Co/Ni$  multilayer electrodes / **Ia. Lytvynenko**, C. Deranlot, S. Andrieu, T. Hauet // *J. Appl. Phys.* – 2015. – V. 117. – P. 053906 (1 - 4).

2. Time scales of bias voltage effects in  $Fe/MgO$ -based magnetic tunnel junctions with voltage-dependent perpendicular anisotropy / **Ia. M. Lytvynenko**, T. Hauet, F. Montaigne, V. V. Bibyk, S. Andrieu // *J. Magn. Magn. Mat.* – 2015. – V. 396 C. – P. 333 - 337.

3. **Lytvynenko Ia.** The effect of  $Co$  or  $Ag$  addition on magnetotransport and magnetic properties of  $Ni_{80}Fe_{20}$  thin films / **Ia. M. Lytvynenko**, I. M. Pazukha, V. V. Bibyk // *Vacuum.* – 2015. – V. 116. – P 31 - 35.

4. Interfaces anisotropy in single crystal V/Fe/V trilayer / D. Louis, **Ia. Lytvynenko**, T. Hauet, D. Lacour, M. Hehn, S. Andrieu, F. Montaigne // *J. Magn. Magn. Mat.* - 2014. – V. 372. – P. 233 - 235.

5. **Литвиненко Я.М.** Структурні, магнітні та магніторезистивні властивості трикомпонентного плівкового сплаву Ni-Fe-Co / Я. М. Литвиненко, І. М. Пазуха, В. В. Бібик // *Ж. нано-електрон. физ.* – 2014. – Т. 6. - № 2. – С. 02014 (1 – 7).

## 2. Наукові праці апробаційного характеру

6. Тензо- и магніторезистивные свойства чувствительных элементов датчиков на основе пленочных систем Ag/Co и Ni<sub>x</sub>Fe<sub>1-x</sub> / З. Н. Макуха, О. В. Сынашенко, **Я. Н. Литвиненко**, Ю. М. Шабельник, И. Е. Проценко // *Материалы международной научно-практической конференции [«Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте 2012»]*, (Одесса, 2012). - Одесса, 2012. - С. 64 – 75.

7. Electric field effect on magnetic anisotropy of V/Fe/MgO/Fe/Co epitaxial tunnel junction / **Ia. M. Lytvynenko**, T. Hauet, A. Rajanikanth, F. Montaigne, V. V. Bibyk, S. Andrieu // *Materials of International Conference of Students and Young Scientists in Theoretical and Experimental Physics [«HEUREKA-2014»]*, (Lviv, 15-17 May, 2014). - Lviv, 2014. – P. 139.

8. Time dependence of resistance of single-crystal magnetic tunnel junctions with MgO barrier / **Ia. M. Lytvynenko**, T. Hauet, A. Rajanikanth, F. Montaigne, V. V. Bibyk, S. Andrieu // *Abstract book of Summer school and International research and practice conference [«Nanotechnology and nanomaterials - NANO-2014»]*, (Yaremche - Lviv, 23-30 August, 2014). - Kyiv, 2014. – P. 220.

9. **Литвиненко Я. М.** Спін-вентильні структури на основі мультишарів Co/Ni з перпендикулярною магнітною анізотропією як елементи спінтронних приладів / Я. М. Литвиненко, В. В. Бібик, Т. Хаует // *Матеріали І Всеукраїнської науково-технічної конференції [«Актуальні проблеми автоматики та приладобудування»]*, (Харків, 11 - 12 грудня 2014 р.). - Харків, 2014. – С. 97 - 98.

10. Influence of annealing temperature on the phase state of thin films alloy based on Fe<sub>20</sub>Ni<sub>80</sub> and Co / **Ia. M. Lytvynenko**, I. M. Pazukha, H. Shirzadfar, V. V. Bibyk // *Materials of the 14th International Young Scientists Conference [«Optics and High Technology Material Science - SPO 2013»]*, (Kyiv, 24 - 27 October 2013). - Kyiv, 2013. – P. 83 - 84.

11. **Lytvynenko Ya. M.** The structure and magnetoresistive properties of polycrystalline film alloy based on FeNi and Co / Ya. M. Lytvynenko, V. V. Bibyk // *Abstract book of Summer school and International research and practice conference [«Nanotechnology and nanomaterials - NANO-2013»]*, (Bukovel, 29 August – 1 September 2013). - Bukovel, 2013. – P. 139.

12. **Литвиненко Я. М.** Магніторезистивні властивості трикомпонентного плівкового сплаву (FeNi)<sub>x</sub>Ag<sub>1-x</sub> / Я. М. Литвиненко, І. О. Шпетний //

Матеріали Міжнародної конференції студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики [«ЕВРИКА-2013»], (Львів, 15 – 17 травня 2013 р.). – Львів: ЛНУ, 2013. – С. А17

13. **Lytvynenko Ya. M.** The effect of annealing on the magnetoresistive properties of  $(\text{FeNi})_x\text{Co}_{1-x}$  thin films / Ya. M. Lytvynenko, V. A. Siruk // Матеріали та програма науково-технічної конференції [«Фізика, електроніка, електротехніка, ФЕЕ-2013»], (Суми, 22 - 27 квітня 2013 р.). – Суми: Вид-во СумДУ, 2013. – С. 119.

14. **Lytvynenko Ia. M.** Magnetic properties of thin film Ni-Fe-Co alloy / Ia. M. Lytvynenko // Матеріали та програма науково-технічної конференції [«Фізика, електроніка, електротехніка, ФЕЕ-2014»], (Суми, 22 - 27 квітня 2014 р.). - Суми: Вид-во СумДУ, 2014. – С. 119.

15. **Литвиненко Я. М.** Вплив термообробки на магніторезистивні властивості трикомпонентних плівок  $(\text{FeNi})_x\text{Ag}_{1-x}$  / Я. М. Литвиненко, І.О. Шпетний // Матеріали XVI Міжнародного молодіжного форуму [«Радиоелектроніка і молодь в XXI столітті»], (Харьков, 17 - 19 квітня 2012 г.). – Харьков: ХНУРЕ, 2012. – Т. 1. - С. 73 – 74.

### 3. Праці, які додатково відображають наукові результати

16. The effect of annealing on magnetic properties of Co/Gd multilayers / S. Vorobiov, **Ia. Lytvynenko**, T. Hauet, M. Hehn, D. O. Derecha, A. M. Chornous // Vacuum. – 2015. – V. 120. – P. 9 – 12.

17. Magneto-optical properties of film systems based on ferromagnetic materials / T. M. Grychanovska, L. A. Sheshenia, **Ia. M. Lytvynenko**, V. V. Bibyk // Proc. of 3rd Int. Conf. [«Nanomaterials: Applications and Properties»], (Lviv, 21–27 September 2014). - Sumy: SSU, 2014. – V. 3, № 1. – P. 01NTF06-1 – 01NTF06-3.

18. Magnetic properties investigation of nanoparticles ensembles based on solid solutions with FePt oxide shell / I. O. Shpetnyi, **Ya. M. Lytvynenko**, O. V. Pylypenko, I. Yu. Protsenko, S. A. Nepijko, G. Schönhense // Materials of International Conference of Students and Young Scientists in Theoretical and Experimental Physics [«HEUREKA-2012»], (Lviv, 19 - 22 April, 2012). – Lviv: LNU, 2012. – P. E17.

## АНОТАЦІЯ

**Литвиненко Я. М. Фізичні процеси в приладових структурах з перпендикулярною магнітною анізотропією. – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем. – Сумський державний університет, Суми, 2016.

Дисертацію присвячено комплексному дослідженню структурних, магнітних та магніторезистивних властивостей тонкоплівкових систем з

перпендикулярною магнітною анізотропією: мультишарів Co/Ni, спин-вентилів та магнітних тунельних переходів на їх основі, а також епітаксійних тунельних переходів на основі Fe та MgO. У роботі визначені оптимальні умови формування плівкових систем з ПМА та досліджена їх кристалічна структура. Вперше досліджено магнітні та магніторезистивні властивості тунельних переходів на основі мультишарів [Co/Ni]<sub>n</sub> та аморфного бар'єру Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> у випадку паралельної та ортогональної орієнтації спонтанної намагніченості електродів. Аналіз результатів дослідження тунельних переходів V/Fe/MgO/Fe/Co дозволив визначити умови виникнення явище квантової ями на інтерфейсі V/Fe, встановити залежність ПМА ультратонкого шару Fe від полярності та значення напруги зміщення. Для магнітних тунельних переходів на основі Fe та MgO з ортогональною орієнтацією намагніченості електродів досліджено залежність опору від часу дії напруги та встановлено фактори, що викликають нестабільність опору.

**Ключові слова:** тонкоплівкова структура, перпендикулярна магнітна анізотропія, магнітний тунельний перехід, намагніченість, діелектричний бар'єр, тунелювання, напруга зміщення.

## АННОТАЦИЯ

**Литвиненко Я. Н. Физические процессы в приборных структурах с перпендикулярной магнитной анизотропией. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – физика приборов, элементов и систем. – Сумский государственный университет, Сумы, 2016.

Диссертация посвящена комплексному исследованию структурных, магнитных и магниторезистивных свойств тонкопленочных систем с перпендикулярной магнитной анизотропии: мультислоев Co/Ni, спин-вентилей и магнитных туннельных переходов на их основе, а также эпитаксиальных туннельных переходов на основе Fe и MgO. В работе определены оптимальные условия формирования пленочных систем с ПМА и исследована их кристаллическая структура. Впервые исследованы магнитные и магниторезистивные свойства туннельных переходов на основе мультислоев [Co/Ni]<sub>n</sub> и аморфного барьера Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в случае параллельной и ортогональной ориентации спонтанной намагниченности электродов. Анализ результатов исследования туннельных переходов V/Fe/MgO/Fe/Co позволил определить условия возникновения явления квантовой ямы на интерфейсе V/Fe, определить зависимость ПМА ультратонкого слоя Fe от полярности и значения напряжения смещения. Для магнитных туннельных переходов на основе Fe и MgO с ортогональной ориентацией намагниченности электродов исследована зависимость сопротивления от времени действия напряжения и определены факторы, вызывающие нестабильность сопротивления.

**Ключевые слова:** тонкопленочная структура, перпендикулярная магнитная анизотропия, магнитный туннельный переход, намагниченность,

диэлектрический барьер, туннелирование, напряжение смещения.

## ABSTRACT

**Lytvynenko Ia. M. Physical processes in device structures with perpendicular magnetic anisotropy. – Manuscript.**

The thesis for degree of Doctor of Philosophy (Ph.D.) in physical and mathematical sciences on specialty 01.04.01 – Physics of Devices, Components and Systems. – Sumy State University, Sumy, 2016.

The thesis is devoted to complex research of structural, magnetic and magneto-resistive properties of thin film systems with perpendicular magnetic anisotropy (PMA): multilayers Co/Ni, the spin-valves and magnetic tunnel junctions (MTJ) on their basis, as well as epitaxial tunnel junctions based on Fe and MgO.

The thesis shows the optimal conditions for the formation of film systems with PMA and studies their crystal structure. The magnetic and magnetoresistive properties of tunnel junctions based on multilayers  $[\text{Co/Ni}]_n$  and amorphous  $\text{Al}_2\text{O}_3$  barrier in the case of parallel and orthogonal orientation of the electrodes magnetization were obtained and studied for the first time. Overall, the received results provide encouragement that it will be possible to achieve larger PMA and TMR values for Co/Ni-based magnetic tunnel junction with both PMA electrodes. MTJs with orthogonal magnetic geometry have possible use in sensors, OST-MRAM, and RF oscillator.

The analysis of the study results of V/Fe/MgO/Fe/Co tunnel junction with the in plane magnetization of the both electrodes allows determining the conditions for the occurrence of the quantum well effect at the V/Fe interface. This phenomenon can be used for TMR value increasing.

In the case of MTJ with one PMA-electrode, PMA dependence of the ultrathin epitaxial Fe layer on the polarity and value of the bias voltage was determined. Only positive bias tunes the ultrathin Fe layer anisotropy and negative bias has no influence on it.

For magnetic tunnel junctions based on Fe and MgO with orthogonal electrodes magnetization orientation the dependence of the resistance on the bias duration was investigated and the factors causing instability resistance were considered. At the switching from positive to negative voltage (and vice-versa) with the same amplitude, the MTJ resistance changes in two steps: a sharp change and a much slower resistance variation over a few minutes to a few hours depending on the voltage amplitude and the temperature. This process is thermally activated that can be related to a single energy barrier. Furthermore it has been shown that the resistance change is not correlated to a change in soft electrode anisotropy so that Fe–O bonds at bottom Fe/MgO interface are not at the origin of the resistance change.

**Keywords:** thin film structure, perpendicular magnetic anisotropy, magnetic tunnel junction, magnetization, dielectric barrier, tunneling, bias voltage.



Підписано до друку 26. 04. 2016р.  
Формат 60х90/16. Ум. друк. арк. 1,1. Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 100 пр. Зам. № 381

Видавець і виготовлювач  
Сумський державний університет,  
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.