

ІНСТИТУТ МАГНЕТИЗМУ НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ
ТА МІНІСТЕРСТВА ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

КОЗАК Ірина Михайлівна



УДК 537.621.5; 537.622; 537.624;
538.955; 537.635; 537.638.2

**ТЕРМОМАГНІТНЕ КЕРУВАННЯ ОБМІННИМИ ВЗАЄМОДІЯМИ В
МАГНІТНИХ БАГАТОШАРОВИХ ТА ГРАНУЛЬОВАНИХ
ПЛІВКОВИХ НАНОСТРУКТУРАХ**

01.04.11 – магнетизм

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті магнетизму НАН України та МОН України.

Науковий керівник: кандидат фізико-математичних наук,
Кравець Анатолій Федорович,
Інституту магнетизму НАН України та
МОН України, старший науковий співробітник

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Решетняк Сергій Олександрович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут», професор
кафедри загальної та експериментальної фізики

доктор фізико-математичних наук, професор
Семенко Михайло Петрович,
Київський національний університет імені Тараса
Шевченка, професор кафедри фізики металів
фізичного факультету

Захист відбудеться « 5 » листопада 2015 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.248.01 при Інституті магнетизму НАН України та МОН України за адресою: 03142, м. Київ, бульвар Вернадського, 36-б, конференц-зал Інституту магнетизму НАН України та МОН України.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України за адресою: 03142, м. Київ, бульвар Вернадського, 36.

Автореферат розіслано « 1 » жовтня 2015 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої Ради Д 26.248.01
кандидат фізико-математичних наук

 Л. С. Козлова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Механізми обмінних взаємодій в магнітних наноструктурах різного типу є предметом дослідження спітроніки – галузі фізики магнетизму, яка дуже інтенсивно розвивається протягом останніх років. Однією із головних проблем в прикладній спітроніці залишається проблема керування магнітними станами нанорозмірних феромагнетиків, які є складовими різноманітних багат шарових спітронічних пристроїв – спінових вентилів, магнітних тунельних переходів, елементів магнітної енергонезалежної пам'яті, нанорозмірних осциляторів, тощо, безпосередньо, без прикладання магнітного поля. Міжшарові обмінні взаємодії в таких пристроях, такі як пряма феромагнітна, непряма осцилююча, магнітостатична неслівська, а також обмінна взаємодія на межі поділу феромагнетик-антиферомагнетик відіграють домінуючу роль в магнітному упорядкуванні в цих структурах. Ці обмінні взаємодії слабо змінюються при незначних змінах температури в околі кімнатної. Важливою залишається проблема знаходження менш енерговитратних і більш швидкодіючих методів управління магнітними станами та обмінними взаємодіями нанорозмірних феромагнетиків, що є складовими вищезазначених спітронічних пристроїв. Термічне управління обмінною взаємодією між двома нанорозмірними шарами сильних феромагнетиків F_1 і F_2 через прошарок слабого феромагнетика f в тришарових наноструктурах $F_1/f/F_2$, що є предметом дослідження дисертаційної роботи, дозволяє забезпечити можливість термомагнітного керування магнітними і транспортними властивостями, а також розширює функціональні можливості різноманітних пристроїв спітроніки, побудованих на базі досліджених обмінно зв'язаних тришарових наноструктур.

Дослідження магнітних наногранульованих плівок, які містять наногранули металевого феромагнетика в немагнітній матриці, є також однією із важливих задач магнітоелектроніки. Інтерес до магнітних наногранульованих матеріалів обумовлений яскравими фізичними явищами, що проявляються в них під впливом магнітного поля, а саме – ефектами гігантського магнітоопору, тунельного магнітоопору, гігантського ефекту Холла, магніторефрактивного ефекту та ін. В залежності від провідних властивостей немагнітної матриці наногранульовані плівки поділяють на два основні класи – металеві та металодіелектричні. Варто відмітити, що властивості магнітних наногранульованих плівок залежать як від матеріалів магнітних гранул, їх розмірів і концентрації, так і від типу немагнітної матриці, що суттєво впливає на міжгранульну обмінну взаємодію та поріг магнітної кореляції в цих структурах, як це продемонстровано в дисертаційній роботі. Якщо відмінності в транспортних властивостях магнітних наногранульованих

плівки з різними типами матриць досліджені досить добре, то інтерпретація відмінностей в поведінці таких систем при намагнічуванні і феромагнітному резонансі (ФМР) викликає затруднення. З точки зору магнітних властивостей як провідна, так і діелектрична матриці майже не відрізняються, оскільки магнітні проникності обох близькі до одиниці. Проте характер провідності матриці суттєво впливає на обмінні міжгранульні взаємодії і, як результат, на колективну поведінку магнітних моментів окремих наногранул, що знаходить відображення в магнітотранспортних властивостях, а також в намагніченості і феромагнітному резонансі магнітних наногранульованих плівок, як це було встановлено в дисертаційній роботі. Вивчення цих структур дозволило встановити певні закономірності у характері міжгранульної обмінної взаємодії.

Дослідження термічного управління магнітними властивостями багатшарових наноструктур з прошарками розбавленого феромагнетика, а також міжгранульних обмінних взаємодій в магнітних наногранульованих структурах магнітометричними, магніторезонансними та магнітотранспортними методами є важливим з точки зору практичного застосування цих структур в спінтронних пристроях. Завданням дисертаційної роботи є заповнення прогалів в даних дослідженнях.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, що складають зміст дисертаційної роботи, були проведені в рамках бюджетних та конкурсних тем, які виконувались у відділі фізики плівок Інституту магнетизму НАН України та МОН України: «Розробка фізичних основ створення новітніх плівкових матеріалів з високим ступенем поляризації електронів для використання в приладах спінтроніки» (2009-2013 р.р., р.н. 0108U010838); «Одержання та дослідження фізико-хімічних властивостей плівок половинних металів з високим ступенем спінової поляризації електронів» (2010-2014 р.р., р.н. 0109U008554); «Розробка експериментальної методики отримання плівкових наноструктур з підвищеною намагніченістю та з високим ступенем спінової поляризації електронів провідності для використання в спінтроніці та НВЧ техніці» (2012-2014 р.р., р.н. 0112U001010); «Магнітні наноструктури з термоелектронним керуванням магнітними станами для застосування в спінтроніці» (2015-2017 р.р., р.н. 0115U000974); «Міжшарові взаємодії в магнітних наноструктурах з товщинами, співрозмірними з їх характеристичними параметрами» (в рамках цільової комплексної програми фундаментальних досліджень НАН України “Фундаментальні проблеми наноструктурних систем, наноматеріалів, нанотехнологій”, р.н. 0114U002748).

У всіх цих науково-дослідних роботах Козак І. М. була відповідальним виконавцем. Її роль полягала у виготовленні зразків, дослідженні їх магнітних, магніторезистивних та магніторезонансних властивостей, написанні звітів по цих темах.

Мета і задачі досліджень. Метою дисертаційної роботи є встановлення закономірностей прояву міжшарових обмінних взаємодій в багатошарових магнітних наноструктурах через прошарки розбавлених феромагнетиків та міжгранульних обмінних взаємодій в гетерогенних структурах з різним типом матриці.

Для досягнення мети роботи були вирішені наступні *завдання*:

- виготовлені магнітні багатошарові наноструктури з температурно-керованим міжшаровим обміном;
- виготовлені магнітні наногранульовані плівки з різними типами міжгранульної електронної провідності та міжгранульних обмінних взаємодій;
- розроблені фізичні основи термічного управління магнітними, електричними і магнітотранспортними властивостями магнітних багатошарових наноструктур;
- досліджений вплив міжгранульних обмінних взаємодій в магнітних наногранульованих структурах на їх статичні і динамічні магнітні властивості;
- виявлена роль непрямого обміну при встановленні магнітного впорядкування в магнітних наногранульованих плівках.

Об'єкт дослідження – тришарові магнітні наноструктури, які складаються з двох шарів сильних феромагнетиків, розділених прошарком розбавленого феромагнетика, вільні плівки розбавленого феромагнетика та магнітні наногранульовані плівки, які містять наногранули металевого феромагнетика в немагнітних матрицях з металевим або діелектричним типами електронної провідності.

Предмет дослідження – температурно залежна міжшарова обмінна взаємодія між феромагнітними шарами через прошарок слабого феромагнетика в магнітних багатошарових наноструктурах; залежність магнітних властивостей багатошарової структури від магнітного стану прошарку розбавленого феромагнетика NiCu; залежність непрямої обмінної взаємодії між гранулами феромагнетика в наногранульованих матеріалах від типу немагнітної матриці.

Методи дослідження. Магнітні багатошарові наноструктури були виготовлені методом магнетронного осаджування з використанням обладнання AJA Orion 8-Target Deposition System. Магнітні наногранульовані плівки були виготовлені методом електронно-променевого випаровування магнітних і немагнітних складових із двох джерел з використанням модернізованої вакуумної установки ВУ-2М. Магніторезонансні властивості були досліджені методом феромагнітного резонансу на спектрометрі ELEXSYS E500 (Bruker BioSpin GmbH, Germany). Температурні та польові залежності намагніченості були досліджені методами SQUID та вібраційної магнітометрії. Магнітотранспортні властивості були досліджені методом

чотирьох контактів. Теоретичний аналіз і розрахунки магнітних параметрів досліджуваних об'єктів були проведені на основі феноменологічного та чисельного моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів. На основі експериментальних досліджень та модельних розрахунків у дисертаційній роботі були отримані наступні наукові результати:

1. Вперше експериментально продемонстровано термомагнітне управління міжшаровою обмінною взаємодією та намагніченістю в магнітних багатошарових наноструктурах вентильного типу $F_1/f/F_{2\text{ pin}}$. Встановлено, що магнітне перемикання може бути досягнуте або зміною температури, або магнітного поля, або комбінацією обох параметрів.

2. Визначено вплив ефекту близькості на інтерфейсах F_1/f і f/F_2 в структурі $F_1/f/F_{2\text{ pin}}$ на розподіл намагніченості в прошарку f . На основі феноменологічного моделювання показано, що підмагнічування на межі поділу F/f – неоднорідне.

3. Вперше на основі резонансних досліджень в структурі $F_1/f/F_{2\text{ pin}}$, експериментально визначено залежність впливу міжшарової обмінної взаємодії на ефективну намагніченість M_{eff} вільного шару F_1 від товщини прошарку d та концентрації магнітної компоненти x в ньому. Встановлено, що зі зменшенням товщини прошарку f і збільшенням в ньому концентрації N_i відбувається збільшення M_{eff} шару F_1 через підсилення обмінної взаємодії між шарами F_1 і $F_{2\text{ pin}}$.

4. Вперше запропонована феноменологічна модель непрямой міжгранульної обмінної взаємодії в магнітних наногранульованих матеріалах, яка показує, що поляризація в підсистемі електронів провідності сприяє встановленню обмінної взаємодії між магнітними моментами гранул. На основі магніторезонансних досліджень виявлено вплив провідних властивостей немагнітної матриці на колективні властивості наногранульованих систем.

Практичне значення одержаних в роботі результатів полягає у розширенні уявлення про природу фізичних явищ в магнітних багатошарових і наногранульованих наноструктурах, в результаті реалізації комплексного підходу у вивчені фізичних основ управління магнітними, електричними і магнітотранспортними властивостями шаруватих наноструктур з термомагнітно керованим міжшаровим обміном, що дозволить їх використовувати у якості елементів термокерованої магнітної енергонезалежної пам'яті, термомагнітних стабілізаторів, осциляторів та матеріалів для магнітного запису інформації підвищеної щільності.

Особистий внесок здобувача полягає у самостійному пошуку й аналізі літературних даних за темою дисертаційної роботи, виготовленні частини зразків для дослідження та проведенні досліджень і інтерпретації результатів. За безпосередньої участі автора були проведені дослідження феромагнітного

резонансу, магнітоопору, оброблені результати досліджень. Самостійно автором зроблено обробку й аналіз отриманих експериментальних даних по магнітометричному вимірюванню. Автор брала активну участь в обговоренні результатів, формуванні висновків, побудові моделей і написанні статей. Частина теоретичних розрахунків була виконана автором спільно з д.ф.-м.н. проф. Джежерейо Ю.І., з д.ф.-м.н. проф. Погорілим А.М., з д.ф.-м.н. проф. Товстолиткіним О.І. Магнітні дослідження були виконані спільно к.ф.-м.н. Кравцем А.Ф. Дослідження феромагнітного резонансу в магнітних багат шарових наноструктурах були виконані спільно з д.ф.-м.н. Голубом В.О., а магніторезонансні дослідження магнітних наногранульованих плівок виконані спільно з д.ф.-м.н. проф. Погорілим А.М. Магнітометричні дослідження багат шарових наноструктур були виконані у співавторстві із співробітниками Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б.І. Веркіна (м. Харків) та Королівського технологічного інституту (Швеція, м. Стокгольм).

Постановка завдань і визначення напрямів досліджень здійснювалася спільно з науковим керівником к.ф.-м.н. Кравцем А. Ф. згідно плану дисертаційної роботи.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на міжнародних та всеукраїнських конференціях:

- XVII Международный молодежный форум “Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке” (22 – 24 квітня, 2013, м. Харків, Україна).
- Науково-технічна конференція “Фізика, електроніка і електротехніка:: 2013” (22 – 27 квітня, 2013, м. Суми, Україна).
- IX International Conference “Electronics and Applied Physics” (October 23 – 26, 2013, Kyiv, Ukraine).
- IEEE International Magnetism Conference, INTERMAG Europe 2014, (May 4 – 8, 2014, Dresden, Germany).
- III International summer school “Nanotechnology: from fundamental research to innovations” (August 23 – 26, 2014, Yaremche, Ukraine).
- 2nd International research and practice conference Nanotechnology and Nanomaterials (August 27 – 30, 2014, Lviv, Ukraine).
- X International Conference “Electronics and Applied Physics” (October 22 – 25, 2014, Kyiv, Ukraine).
- Науково-технічна конференція “Фізика, електроніка і електротехніка:: 2015” (20 – 25 Квітня, 2015, м. Суми, Україна).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у 5 наукових статтях у провідних фахових журналах з переліку ВАК України, що входять до наукометричних баз даних: «Physical Review B», «Журнал нано- та електронної фізики», «Металлофізика и новейшие технологии», «Наносистемы, Наноматериалы, Нанотехнологии», а також у 8 публікаціях

конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи складає 135 сторінок. Робота містить 38 рисунків. Список використаних джерел складається із 133 найменувань, розміщених на 15 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обгрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета й основні задачі дослідження, представлені використовувані методи досліджень. Відмічений зв'язок роботи із науковими темами. Висвітлено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів. Наведена інформація про апробацію отриманих результатів, особистий внесок здобувача і структура дисертаційної роботи.

У **першому розділі** представлений огляд літературних джерел за напрямком досліджень, на основі якого стисло викладені основні відомості щодо фізичних властивостей багатошарових та гетерогенних структур на основі сплавів перехідних металів та принципів контролю обмінної взаємодії в них. Зокрема, охарактеризовано основні типи магнітних структур, більш докладно розглянуто шаруваті та гетерогенні матеріали. Відзначено особливу роль обмінних взаємодій при магнітному упорядкуванні структур і їх важливість при виготовленні багатошарових та гранульованих структур з контрольованими параметрами. Проведений аналіз даних щодо методів управління магнітними моментами нанорозмірних феромагнетиків у шаруватих та гранульованих магнітних наноструктурах. Наведено літературні дані по методах виготовлення магнітних наноструктур. Відмічається особлива роль високочутливої та інформативної методики дослідження – феромагнітного резонансу (ФМР).

На основі літературного огляду встановлено, що обмінні взаємодії в об'єктах дослідження є мало вивченими, тому дисертаційна робота спрямована на заповнення існуючих прогалів в знаннях про ці структури.

У **другому розділі** детально описані методи виготовлення магнітних багатошарових та гранульованих наноструктур та методики дослідження їх магнітних, магніторезонансних та магнітотранспортних властивостей. Магнітостатичні властивості магнітних наноструктур, зокрема петлі гістерезису і температурні залежності намагніченості, були досліджені з використанням вібраційної та SQUID магнітометрії. Магніторезонансні властивості були досліджені методом електронного спінового резонансу. Вимірювання виконувались на спектрометрі ELEXSYS E500 (Bruker BioSpin GmbH, Germany), обладнаному автоматичним гоніометром та температурною приставкою. Для дослідження магніторезистивних властивостей плівок

застосовували метод чотирьох контактів. Вимірювання магнітоопору було проведено при паралельній та перпендикулярній орієнтації зовнішнього магнітного поля відносно площини зразка.

Третій розділ, який складається із п'яти підрозділів, присвячений дослідженню впливу терморегульованого міжшарового обміну на магнітні властивості багат шарових наноструктур вентильного типу $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(10 \text{ нм})/\text{Ni}_x\text{Cu}_{100-x}(d \text{ нм})/\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}(5 \text{ нм})/\text{Mn}_{80}\text{Ir}_{20}(12 \text{ нм})$, далі $F_1/f/F_{2 \text{ pin}}$. Тут терморегульований обмін відбувається між двома шарами сильних феромагнетиків – «вільним» шаром $F_1 = \text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ та закріпленім шаром $F_{2 \text{ pin}} = \text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Mn}_{80}\text{Ir}_{20}$ – через прошарок розбавленого феромагнітного сплаву $f = \text{Ni}_x\text{Cu}_{100-x}$. З метою виявлення залежності терморегульованої обмінної взаємодії від товщини d та складу x прошарку f були виготовлені дві серії зразків: 1) з фіксованою товщиною $d = 6 \text{ нм}$ і різним складом $x = 0 - 62 \text{ ат. \%}$; 2) з фіксованим складом $x = 54 \text{ ат. \%}$ та з різною товщиною $d = 3 - 9 \text{ нм}$. Багат шарові структури $F_1/f/F_{2 \text{ pin}}$ були осаджені на термоокисдовані кремнієві підкладки за допомогою методу магнетронного розпорощування.

У *підрозділі 3.1* теоретично описані терромагнітні ефекти в обмінно-з'язаній тришаровій структурі $F_1/f/F_{2 \text{ pin}}$ (рис. 1) в рамках запропонованої феноменологічної моделі. Встановлено, що на межах F_1/f і $f/F_{2 \text{ pin}}$ відбувається підмагнічування інтерфейсних областей шарів слабого феромагнетика f внаслідок ефекту близькості. При цьому розподіл намагніченості в прошарку f стає сильно нерівномірним – на краях магнітний момент більший, ніж всередині. На рис. 2 приведені розподіли намагніченості в прошарку f для структури $F_1/f/F_{2 \text{ pin}}$ для паралельного і антипаралельного впорядкування магнітних моментів зовнішніх феромагнітних шарів F_1 і $F_{2 \text{ pin}}$. Температура обрана такою, що міжшаровий обмін від наведеного феромагнетизму розривається в центрі прошарку f .

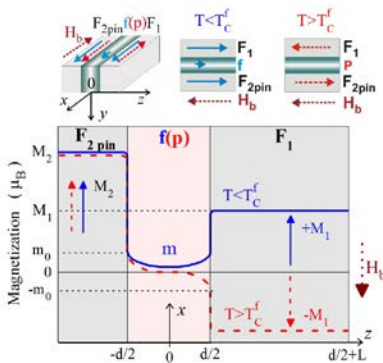


Рис. 1. Розподіл намагніченості в структурі $F_1/f/F_{2 \text{ pin}}$ при високих ($T > T_c^f$) і низьких ($T < T_c^f$) температурах. Верхня частина ілюструє конфігурацію магнітних моментів M_1 і M_2 феромагнітних шарів F_1 і $F_{2 \text{ pin}}$ при температурі нижче і вище ефективної температури Кюрі T_c^f шару слабого феромагнетика f ; стрілки вказують напрямок магнітних моментів шарів.

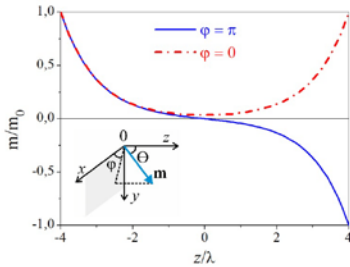


Рис. 2. Розрахований розподіл намагніченості всередині прошарку f тришарової структури $F_1/f/F_{2\text{ pin}}$ для паралельного ($\varphi = 0$) і антипаралельного ($\varphi = \pi$) впорядкування магнітних моментів зовнішніх феромагнітних шарів F_1 і $F_{2\text{ pin}}$.

У підрозділі 3.2 представлені результати досліджень намагніченості багатошарових структур $F_1/\text{Ni}_x\text{Cu}_{100-x}(6\text{ nm})/F_{2\text{ pin}}$ в залежності від складу прошарку: $x = 35, 40, 45$ і 52 ат.% Ni. Петлі перемагнічування, виміряні методом SQUID магнітометрії при температурах 5 K та 300 K, приведені на рис. 3. Петлі складаються із двох характерних частин, які виникають від перемагнічування «вільного» F_1 і «закріпленого» $F_{2\text{ pin}}$ шарів. Шар F_1 , особливо при температурі 5 K, перемагнічується не відразу, а плавно у деякому діапазоні магнітних полів, що пояснюється дисперсією властивостей вздовж площини інтерфейсу F_1/f , а також утворенням і перемагнічуванням доменної структури у шарі F_1 . Шар $F_{2\text{ pin}}$ перемагнічується далеко від нульового поля через обмінну взаємодію з антиферомагнетиком. Форма петель перемагнічування $F_1/\text{Ni}_x\text{Cu}_{100-x}/F_{2\text{ pin}}$ подібна петлям звичайного спінового вентиля $F_1/\text{Cu}(6\text{ nm})/F_{2\text{ pin}}$, з тією лише різницею, що при товщині немагнітного прошарку 6 nm для спінового вентиля, зважаючи на відсутність будь-якої помітної обмінної (за винятком Неєлівської) взаємодії, зміщення мінорної петлі $H_{\text{coupl}} \approx 0$.

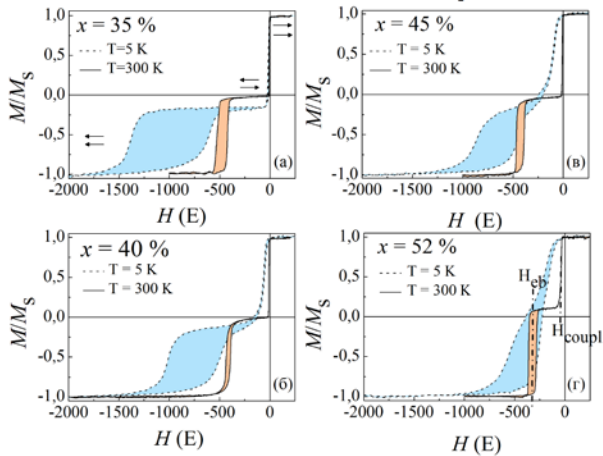


Рис. 3 (а) Петлі перемагнічування для тришарової структури $F_1/\text{Ni}_x\text{Cu}_{100-x}/F_{2\text{ pin}}$, виміряні при $T = 300\text{ K}$ і $T = 5\text{ K}$. (а) $x = 35$ ат.% Ni; (б) $x = 40$ ат.% Ni; (в) $x = 45$ ат.% Ni; (r) $x = 52$ ат.% Ni.

Петлі перемагнічування характеризуються обмінними полями H_{coupl} і H_{eb} (див. рис. 4 а), де H_{coupl} – поле обмінної взаємодії між шарами F_1 і $F_{2\text{pin}}$, а H_{eb} – поле обмінної взаємодії між шаром F_2 і шаром антиферомагнетика. З ростом x при $T = 300$ К і $T = 5$ К, через збільшення обмінної взаємодії, спостерігається монотонне зближення H_{coupl} і H_{eb} (рис. 4 а). Величиною, яка характеризує силу обмінної взаємодії між шарами F_1 і $F_{2\text{pin}}$ через прошарок f , при заданій температурі є різниця обмінних полів $\Delta H_{\text{ex}} = H_{\text{eb}} - H_{\text{coupl}}$ (Рис. 4 б). Чим менше значення ΔH_{ex} , тим сильніша міжшарова обмінна взаємодія F_1 - $F_{2\text{pin}}$. Виявлено, що інтенсивність обмінної взаємодії між шарами F_1 і $F_{2\text{pin}}$ при $T = 5$ К зростає практично лінійно зі збільшенням x .

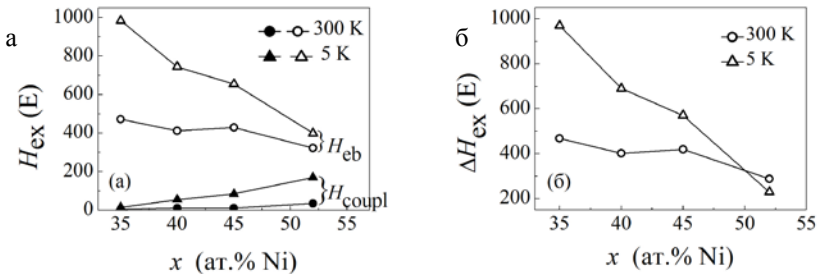


Рис. 4 (а) Обмінні поля H_{coupl} та H_{eb} і (б) різниця обмінних полів ΔH_{ex} для тришарових структур $F_1/\text{Ni}_x\text{Cu}_{100-x}/F_{2\text{pin}}$ з $x = 35, 40, 45$ і 52 at.% Ni, виміряні при $T = 300$ К і $T = 5$ К.

На рис. 5 приведені температурні залежності намагніченості, виміряні в оптимізованих для кожної структури полях підмагнічування H_b , та визначені з них концентраційні залежності температури Кюрі-перемикання, T_{tr} , і напівширини температурного інтервалу перемикання, dT_{tr} , цих структур. Встановлено, що T_{tr} і dT_{tr} сильно залежать від x і збільшуються з ростом x через збільшення обмінної взаємодії в структурі $F_1/\text{Ni}_x\text{Cu}_{100-x}/F_{2\text{pin}}$.

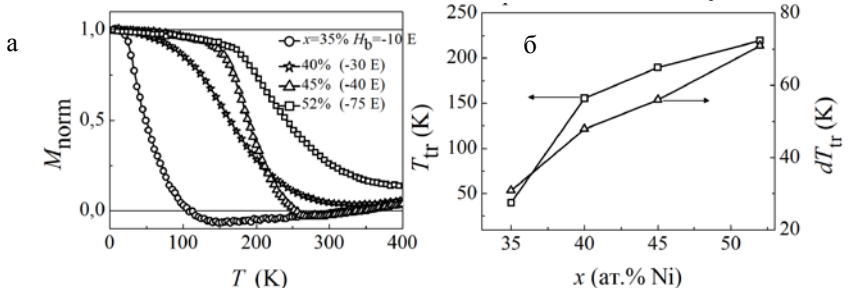


Рис. 5. (а) Температурні залежності намагніченості, виміряні в оптимізованих для кожної структури $F_1/\text{Ni}_x\text{Cu}_{100-x}/F_{2\text{pin}}$ полях підмагнічування H_b . (б) Концентраційні залежності температури Кюрі-перемикання T_{tr} і напівширини температурного інтервалу перемикання dT_{tr} структур $F_1/\text{Ni}_x\text{Cu}_{100-x}/F_{2\text{pin}}$ з $x = 35, 40, 45, 52$ at.% Ni.

У підрозділі 3.3. продемонстровано залежність обмінної взаємодії від параметрів магнітного перемикання, поля і температури на прикладі зразка $F_1/Ni_{40}Cu_{60}(6 \text{ нм})/F_{2 \text{ pin}}$.

На рисунку 6 приведені температурні залежності намагніченості структури $F_1/Ni_{40}Cu_{60}/F_{2 \text{ pin}}$, виміряні в різних прикладених невеликих полях H_b . При переході через точку Кюрі для розбавленого сплаву $Ni_{40}Cu_{60}$ і при правильно підбраному H_b (у нашому випадку це від -15 E до -30 E) відбувається повне перемикання магнітного моменту шару F_1 в $F_1/Ni_{40}Cu_{60}/F_{2 \text{ pin}}$ структурі від паралельного до антипаралельного упорядкування відносно магнітного моменту $F_{2 \text{ pin}}$. Виявлено, що температура T_{tr} і напівширина температурного інтервалу dT_{tr} Кюрі-перемикання сильно залежать від H_b . T_{tr} зростає, а dT_{tr} зменшується зі зменшенням величини H_b . Таким чином, змінюючи зовнішнє поле H_b , можна в широких межах змінювати як температуру, так і чіткість магнітного перемикання в обмінно-зв'язаній структурі $F_1/Ni_{40}Cu_{60}/F_{2 \text{ pin}}$. При цьому невеликі зміни H_b (десятки E) призводять до великих змін T_{tr} (сотні градусів K). Цей результат є підтвердженням того, що даною обмінною взаємодією можна управляти температурою або полем.

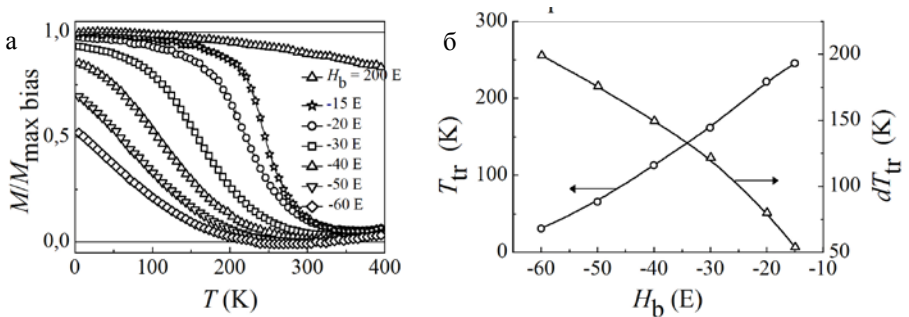


Рис. 6. (а) Температурні залежності намагніченості структури $F_1/Ni_{40}Cu_{60}/F_{2 \text{ pin}}$, виміряні у різних полях H_b . (б) Температури перемикання T_{tr} і напівширини температурних інтервалів перемикання dT_{tr} структури $F_1/Ni_{40}Cu_{60}/F_{2 \text{ pin}}$ для різних полів H_b .

У підрозділі 3.4. приведені результати досліджень магнітних властивостей окремих шарів структур $F_1/f/F_{2 \text{ pin}}$, виконаних методом ФМР

При кімнатній температурі спектри ФМР виявляють два сигнали (рис. 7 а): один відповідає шару F_1 , а другий – F_2 . З відхиленням напрямку зовнішнього поля \mathbf{H} від площини плівки, резонансне поле зміщується у бік вищих полів і досягає максимуму за перпендикулярної орієнтації \mathbf{H} до площини плівки. В результаті на спектрах спостерігається лише одна лінія від F_1 ($H_r \approx 9 \text{ кЕ}$), оскільки лінія від F_2 , за рахунок високої намагніченості, виходить за межі експериментальних можливостей ФМР спектрометра. Із пониженням температури, за орієнтації прикладеного поля в площині плівки,

поведінка резонансних ліній обох шарів F_1 і $F_{2\text{ pin}}$ відображає зменшення величини резонансного поля, відповідно (рис. 7 б).

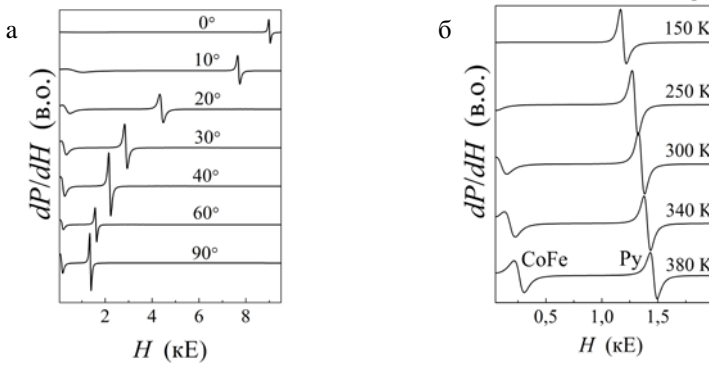


Рис. 7. Типові спектри ФМР, отримані для структури $F_1/\text{Ni}_{54}\text{Cu}_{46}(d \text{ нм})/F_{2\text{ pin}}$. (а) кутова залежність спектрів ФМР при кімнатній температурі (θ – кут відхилення зовнішнього магнітного поля \mathbf{H} від нормалі до площини плівки); (б) температурна залежність спектрів ФМР за орієнтації прикладеного поля \mathbf{H} в площині плівки.

Значення ефективної намагніченості M_{eff} «вільного» шару F_1 в структурах $F_1/\text{Ni}_x\text{Cu}_{100-x}(d)/F_{2\text{ pin}}$ були розраховані із кутових залежностей резонансних полів на основі рівнянь Кіттеля. Кутові залежності $H_{r1}(\theta)$ для зразків з $d = 6$ і 9 нм досить близькі між собою, тоді як для зразка з $d = 3$ нм спостерігається зміщення $H_{r1}(\theta)$ відносно останніх (рис. 8 а). З іншого боку, за сталої температури, залежності $H_{r1}(\theta)$ для структур $F_1/\text{Ni}_x\text{Cu}_{100-x}(6 \text{ нм})/F_{2\text{ pin}}$ з $x = 48$ і 54 ат.% майже співпадають, тоді як при $x = 62$ ат. % залежність $H_{r1}(\theta)$ також зміщується відносно останніх (рис. 8 б). Це є відображенням того, що як при зменшенні d , так і при збільшенні x , обмінна взаємодія між шарами F_1 і $F_{2\text{ pin}}$ підсилюється.

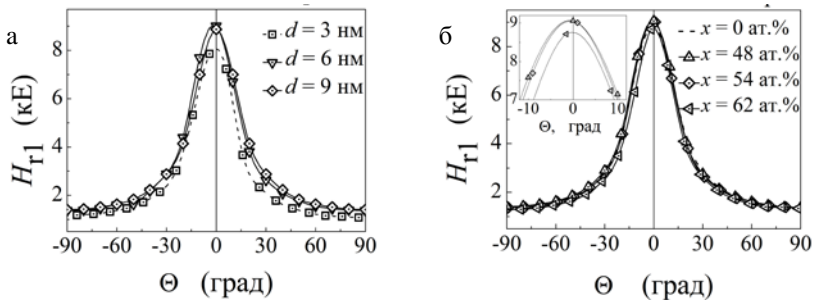


Рис. 8. Кутові залежності резонансних полів H_{r1} шару F_1 : (а) для зразків серії $F_1/\text{Ni}_{54}\text{Cu}_{46}(d \text{ нм})/F_{2\text{ pin}}$; (б) для зразків серії $F_1/\text{Ni}_x\text{Cu}_{100-x}(6 \text{ нм})/F_{2\text{ pin}}$.

Із ФМР досліджень встановлено, що найбільшою міжшаровою обмінною взаємодією характеризуються зразки $F_1/Ni_{54}Cu_{46}(3 \text{ нм})/F_{2 \text{ pin}}$ та $F_1/Ni_{62}Cu_{38}(6 \text{ нм})/F_{2 \text{ pin}}$ (рис. 9). Окрім цього залежність $M_{\text{eff}}(T)$ найбільш круто зростає зі зменшенням температури, що додатково є характерною ознакою підсилення міжшарового обміну.

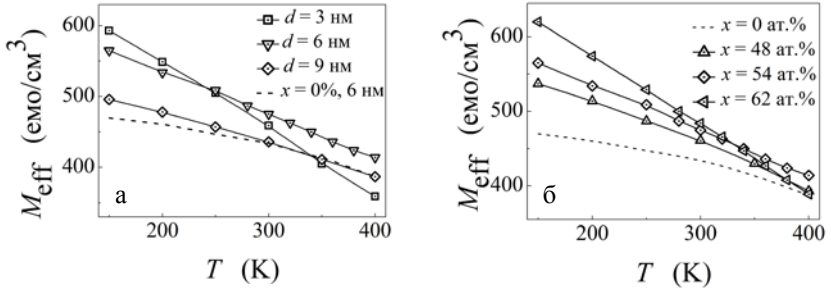


Рис. 9. Температурні залежності ефективної намагніченості M_{eff} шару F_1 : (а) для зразків серії $F_1/Ni_{54}Cu_{46}(d \text{ нм})/F_{2 \text{ pin}}$; (б) для зразків серії $F_1/Ni_xCu_{100-x}(6 \text{ нм})/F_{2 \text{ pin}}$. Пунктирна лінія – температурна залежність $M_{\text{eff}}(T)$ для зразка з $x = 0 \text{ ат. \%}$.

У *підрозділі 3.5.* приведені результати досліджень магнітоопору (МО) плівок Ni_xCu_{100-x} ($d = 100 \text{ нм}$), виготовлених методом магнетронного розпоршування. На рисунку 10 приведені польові залежності МО Ni_xCu_{100-x} плівок у двох геометріях вимірювання.

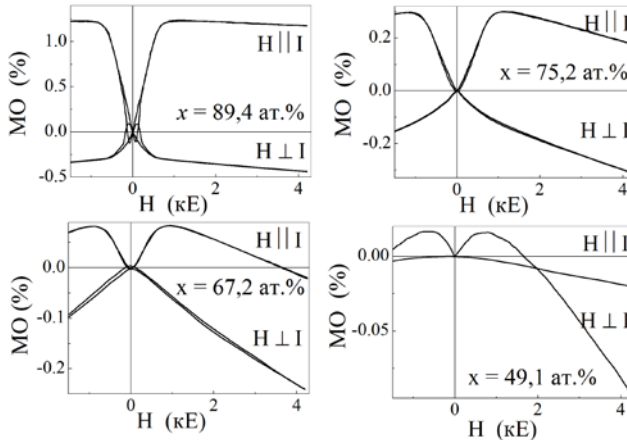


Рис. 10. Польові залежності магнітоопору, виміряні при кімнатній температурі для плівок Ni_xCu_{100-x} з різним x .

Із аналізу форми петель МО можна отримати інформацію про магнітний стан Ni_xCu_{100-x} сплаву. Для зразків з великим вмістом Ni за орієнтації поля

паралельно до зразка помітний додатній МО, характерний для ФМ, а зі збільшенням Cu – подібний до парамагнетиків, що прослідковується для нижніх графіків. Отже, МО сильно залежить від вмісту магнітної складової у плівці Ni-Cu і зі збільшенням вмісту Ni зростає.

Із аналізу результатів магніторезистивних вимірів була визначена критична концентрація переходу $\text{Ni}_x\text{Cu}_{100-x}$ сплаву із феромагнітного у парамагнітний стан. Ця концентрація становить 60 ат.% Ni ($\text{MO} \approx 0$) (рис. 11), на відміну від зразків, які є складовими багатозарової структури, де критичною концентрацією є $x = 35 - 40$ ат.% Ni . Це свідчить про те, що підмагнічування прошарку розбавленого феромагнетика $f = \text{Ni}_x\text{Cu}_{100-x}$ на межі з сильними феромагнетиками F_1 і F_2 pin сильно впливає на магнітний стан прошарку f і суттєво підвищує його ефективну температуру Кюрі.

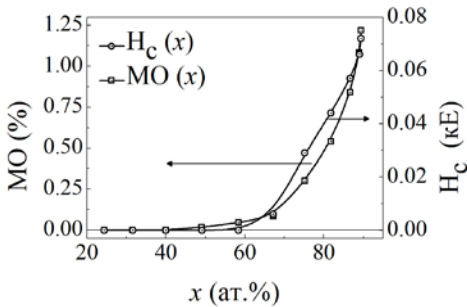


Рис.11 Концентраційні залежності магнітоопору MO і коерцитивності H_c для плівок $\text{Ni}_x\text{Cu}_{100-x}$, виміряні при паралельній орієнтації поля відносно площини плівки H |||

Четвертий розділ «Вплив непрямої обмінної взаємодії на процеси намагнічування і феромагнітний резонанс в магнітних наногранульованих плівках» складається із двох підрозділів і присвячений дослідженню обмінних взаємодій в магнітних наногранульованих структурах з різним типом електронної провідності матриці методом ФМР.

Магнітні наногранульовані плівки $\text{Ru}(\text{CoFe})_x\text{Ag}_{1-x}$ (200 нм) та $\text{Ru}(\text{CoFe})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1-x}$ (200 нм), де x – об'ємна частка магнітної компоненти, були осаджені на керамічні підкладки методом електронно-променевого спів-випаровування магнітної і немагнітної компонент із незалежних джерел. Виготовлено чотири серії зразків: дві з різним матеріалом гранул Ru або CoFe та дві з різним типом електронної провідності немагнітної матриці – Ag або Al_2O_3 .

У підрозділі 4.1. представлені результати досліджень впливу провідних властивостей немагнітних матриць на ФМР у наногранульованих металевих $\text{Ru}_x\text{Ag}_{1-x}$ і металодіелектричних $\text{Ru}_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1-x}$ плівках. Із аналізу спектрів ФМР для паралельної і перпендикулярної орієнтацій площини плівок відносно напрямку прикладеного магнітного поля (рис. 12) було визначено поріг виникнення обміну та магнітної кореляції між гранулами. Поява розходження паралельної і перпендикулярної складових, при збільшенні концентрації магнітних гранул Ru , свідчить про появу обмінної взаємодії між гранулами Ru .

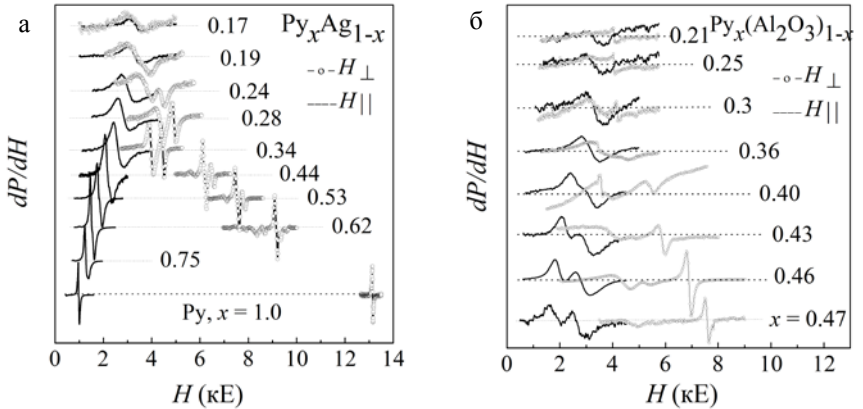


Рис. 12. Спектри ФМР для (а) металевих $\text{Ru}_x\text{Ag}_{1-x}$ і (б) металодіелектричних $\text{Ru}_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1-x}$ наногранульованих плівок різного складу для паралельної (лінії) і перпендикулярної (кружки) орієнтацій площини плівок відносно напрямку прикладеного магнітного поля.

Для опису характерних особливостей концентраційних залежностей резонансних полів ФМР була побудована феноменологічна модель. Якісне узгодження теоретичних та експериментальних концентраційних залежностей резонансних полів ФМР (рис. 13) для металічних $\text{Ru}_x\text{Ag}_{1-x}$ і металодіелектричних $\text{Ru}_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1-x}$ наногранульованих плівок дозволяє встановити, що обмінна взаємодія в металевих $\text{Ru}_x\text{Ag}_{1-x}$ плівках починає проявлятися задовго до порогу структурної перколяції при концентрації магнітної компоненти $x \approx 0,18$, на відміну від систем з непровідною матрицею $\text{Ru}_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1-x}$, де виникнення обмінної взаємодії спостерігається при $x \approx 0,33$. Тобто магнітна кореляція в ансамблі наногранул в металодіелектричних плівках стає істотною тільки при досягненні порогу структурної перколяції.

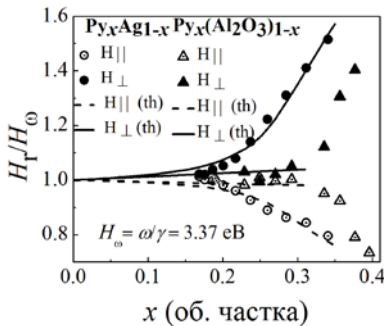


Рис. 13. Порівняння розрахованих (лінії) і експериментальних (точки) концентраційних залежностей резонансних полів ФМР для металевих $\text{Ru}_x\text{Ag}_{1-x}$ і металодіелектричних $\text{Ru}_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1-x}$ плівок для перпендикулярної (верхня гілка ліній) і паралельної (нижня гілка ліній) орієнтацій плівок у магнітному полі.

У підрозділі 4.2. наведені результати визначення параметрів непрямой обмінної взаємодії в металевих $(\text{Co}_{50}\text{Fe}_{50})_{0.13}\text{Ag}_{0.87}$ і металодіелектричних

$(\text{Co}_{50}\text{Fe}_{50})_{0.13}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{0.87}$ наногранульованих пліваках. Запропонована теоретична модель, яка пояснює появу розходження у спектрах ФМР в результаті виникнення непрямого обміну через поляризовану підсистему електронів провідності матриці. Величину обміну визначено за допомогою ефективного поля непрямого обміну $h = (M/\chi_0(T)) - H$, яке сприяє устанавленню магнітного упорядкування в ансамблі наногранул. На основі залежності величини ефективного поля непрямої обмінної взаємодії h від намагніченості M було встановлено, що обмінна взаємодія в плівках з провідною металічною матрицею значно сильніша в порівнянні з діелектричною матрицею (рис. 14 а). Спостерігається чітка лінійна залежність h від намагніченості M . Це дозволяє ввести константу непрямої обмінної взаємодії $k = h/M$ (рис. 14 б). Константа для металевих наногранульованих плівок майже на порядок величини більша порівняно з металодіелектричними плівками.

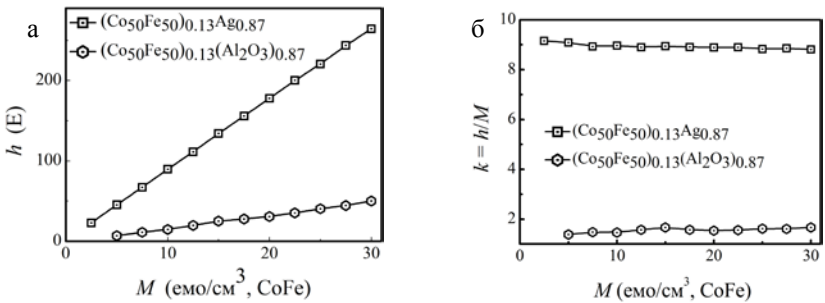


Рис. 14 Залежності ефективних величин полів непрямої обмінної взаємодії h (а) та констант непрямої обмінної взаємодії k від намагніченості M (б) для металевих $(\text{Co}_{50}\text{Fe}_{50})_{0.13}\text{Ag}_{0.87}$ і металодіелектричних $(\text{Co}_{50}\text{Fe}_{50})_{0.13}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{0.87}$ наногранульованих плівок.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі приведені нові наукові результати, які уточнюють і розширюють уявлення про магнітні властивості магнітних багатшарових та гранульованих наноструктур. Згідно з експериментальними та аналітичними дослідженнями отримані наступні наукові результати:

1. Вперше на основі комплексних досліджень експериментально продемонстровано терромагнітне управління міжшаровою обмінною взаємодією та намагніченістю в магнітних багатшарових наноструктурах вентильного типу $F_1/f/F_{2\text{pin}}$, де F_1 – магнітом’який феромагнітний сплав $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ (10 нм); $F_{2\text{pin}}$ – магнітожорсткий феромагнітний сплав $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ (5 нм)/ $\text{Mn}_{80}\text{Ir}_{20}$ (12 нм); f – розбавлений феромагнетик $\text{Ni}_x\text{Cu}_{100-x}$ (d нм). Встановлено, що обмінна взаємодія між шарами сильних феромагнетиків F_1 і $F_{2\text{pin}}$ через прошарок слабого феромагнетика f залежить від температури і

зникає при нагріві структури до ефективної температури Кюрі для матеріалу прошарку f . Виявлено, що при цьому під впливом невеликого магнітного поля H_b (декілька ерстед), прикладеного протилежно напрямку однонаправленої магнітної анізотропії шару $F_{2\text{ pin}}$, магнітні моменти шарів F_1 і $F_{2\text{ pin}}$ впорядковуються антипаралельно, а магнітний момент структури $F_1/f/F_{2\text{ pin}}$ прямує до нуля – відбувається магнітне перемикання в структурі $F_1/f/F_{2\text{ pin}}$ (в термомагнітному перемикачі). Термомагнітний ефект, що спостерігається, є дуже сильним – при зміні H_b всього в декілька десятків ерстед, температура переходу змінюється на сотні градусів К. Встановлено, що магнітне перемикання може бути досягнуте або зміною температури, або магнітного поля, або комбінацією обох параметрів. Це відкриває новий шлях для контролю намагніченості в магнітних нанопристроях на основі термомагнітних перемикачів.

2. Встановлено, що через ефект підмагнічування на інтерфейсах F_1/f і f/F_2 в структурі $F_1/f/F_{2\text{ pin}}$ розподіл намагніченості в прошарку f є сильно неоднорідним, що приводить до суттєвого збільшення ефективної температури Кюрі матеріалу прошарку f (на сотні кельвін), порівняно із випадком, коли f знаходиться у вільному стані.

3. Вперше на основі досліджень феромагнітного резонансу в структурі $F_1/f/F_{2\text{ pin}}$, де f – $\text{Ni}_x\text{Cu}_{100-x}$ (d); ($x = 0, 48, 54$ і 62 ат. %; $d = 3; 6$ і 9 нм) експериментально визначено залежність впливу міжшарової обмінної взаємодії від товщини прошарку d та концентрації магнітної компоненти x в ньому на ефективну намагніченість M_{eff} вільного шару F_1 . Встановлено, що при фіксованій температурі зменшення товщини слабомагнітного прошарку та збільшення вмісту Ni в ньому призводить до сильного збільшення ефективної намагніченості F_1 шару через підсилення обмінної взаємодії між шарами F_1 і $F_{2\text{ pin}}$. Виявлено, що при фіксованих d та x M_{eff} швидко зростає при зменшенні температури.

4. Вперше запропонована феноменологічна модель непрямой міжгранульної обмінної взаємодії в магнітних наногранульованих матеріалах, яка базується на врахуванні обмінного підмагнічування електронів провідності магнітними іонами наногранул. Показано, що поляризація в підсистемі електронів провідності сприяє встановленню обмінної взаємодії між магнітними моментами гранул.

5. Вперше методом феромагнітного резонансу встановлено, що міжгранульна обмінна взаємодія в магнітних наногранульованих плівках з провідною металевою матрицею $\text{P}_{y_x}\text{Ag}_{1-x}$, яка визначається непрямую обмінною взаємодією через поляризовану підсистему вільних електронів, сприяє встановленню магнітної кореляції і магнітного впорядкування в системі магнітних наногранул P_y задовго до порогу структурної перколяції (при $x \approx 0,18$), на відміну від наногранульованих плівок з металодіелектричною матрицею $\text{P}_{y_x}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1-x}$, в яких відсутній подібний

механізм обміну і колективні ефекти стають помітними лише при досягненні порогу структурної перколяції при значно вищих концентраціях ферромагнітного матеріалу ($x \approx 0,33$).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Джежеря Ю.И. Влияние косвенного обменного взаимодействия на ферромагнитный резонанс в магнитных наногранулированных пленках / Ю.И. Джежеря, А.Ф. Кравец, **И.М. Козак**, Е.В. Шипиль, А.Н. Погорелый // Ж. нано-электрон. фіз.. – 2013. – Т. 5, № 4. – С. 04075(7сс).
2. Кравец А.Ф. Температурно-регулируемое межслойное обменное взаимодействие в многослойной структуре $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Ni}_{40}\text{Cu}_{60}/\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Mn}_{80}\text{Ir}_{20}$ / А.Ф. Кравец, А.И. Товстолыткин, **И.М. Козак**, Ю.О. Тихоненко, Ю.А. Савина, В.А. Пашенко // Металлофиз. Новейшие Технол. – 2013. – Т. 35, № 12. – сс. 1675 – 1684.
3. Джежеря Ю.И. Поля непрямых обменных взаимодействий в магнитных наногранулированных пленках / Ю.И. Джежеря, А.Ф. Кравец, **И.М. Козак**, А.Я. Вовк, А.Н. Погорелый // Ж. нано- электрон. фіз.– 2014. – Т. 6, № 2. – С. 02027(5сс).
4. Kravets A.F. Synthetic ferrimagnets with thermomagnetic switching / A.F. Kravets, Yu.I. Dzhezherya, A.I. Tovstolytkin, **I.M. Kozak**, A. Gryshchuk, Yu.O. Savina, V.A. Pashchenko, S.L. Gnatchenko, B. Koop, and V. Korenivski // Phys. Rev. B. – 2014. – Vol. 90. – P. 104427 (9pp).
5. **Козак І.М.** ФМР в обмінно-зв'язаних багатошарових структурах І.М. Козак, Д.М. Поліщук, А.Ф. Кравец, В.О. Голуб, V. Korenivski // Наносистеми, Наноматеріали, Нанотехнології. – 2013. – Т. 13, вип. 1. – сс. 147–159.
6. **Шабельник І. М.** Дослідження обмінного зв'язку в спіновому вентилі з термокерованием прошарком / І. М. Шабельник, А. Ф. Кравец, В. О. Голуб // Матеріали XVII Международного молодежного форума “Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке”, 22 – 24 Квітня, 2013, Харків. – т. 1 – сс. 35 – 36.
7. **Шабельник І. М.** Магнітні властивості спінових вентилів з термокерованием обміном / І. М. Шабельник, А. Ф. Кравец // Матеріали науково-технічної конференції “Фізика, електроніка і електротехніка.: 2013”, 22 – 27 Квітня, 2013, Суми. – 188 с. – С.141.
8. Tykhonenko Yu.O. Spin valves with diluted ferromagnet as a spacer: peculiar features of magnetic state transformations / Yu.O. Tykhonenko, **I.M. Kozak**, Yu.O. Savina, V.A. Pashchenko, A.F. Kravets, A.I. Tovstolytkin // Proceedings of the IX International Conference “Electronics and Applied Physics”, October 23 – 26, Kyiv, Ukraine, 2013. – P. 45 – 46.
9. Kravets A.F. Interlayer exchange and switching in spin-valves with weakly ferromagnetic and paramagnetic spacers / A.F. Kravets, Yu.I. Dzhezherya, A.I. Tovstolytkin, **I.M. Kozak**, Yu.O. Tykhonenko, A. Gryshchuk, Yu.O. Savina, V.A. Paschenko, S.L. Gnatchenko, B.C. Koop, V. Korenivski // Digest book of the IEEE

International Magnetism Conference, INTERMAG Europe 2014, Dresden, Germany, May 4 - 8, 2014, FE-8. – P. 2194-2195. (<http://intermag2014.ifw-dresden.de>)

10. **Kozak I.M.** Thermo- magnetic switching in spin-valve type three layer structure Ni₈₀Fe₂₀/Ni₄₀Cu₆₀/(Co₉₀Fe₁₀)pin / I.M. Kozak, A.F. Kravets, A.I. Tovstolytkin, Yu.O. Savina, V.A. Pashchenko, // Abstract book of the International Summer School “Nanotechnology: from fundamental research to innovations” and International research and practice conference: Nanotechnology and Nanomaterials (NANO-2014), August 23 – 30, 2014, Yaremche – Lviv, Ukraine / Edited by Dr. Olena Fesenko. – L’viv: Eurosvit, 2014. – 600 p. – P. 19.

11. Kravets A.F. Curie-switch A.F. Kravets, Yu.I. Dzhezherya, A.I. Tovstolytkin, **I.M. Kozak**, Yu.O. Savina, V.A. Pashchenko, S.L. Gnatchenko, B. Koop, and V. Korenivski // Abstract book of the International Summer School “Nanotechnology: from fundamental research to innovations” and International research and practice conference: Nanotechnology and Nanomaterials (NANO-2014), August 23 – 30, 2014, Yaremche – Lviv, Ukraine / Edited by Dr. Olena Fesenko. – L’viv: Eurosvit, 2014. – 600 p. – P. 19.

12. Tykhonenko Yu.O. Magnetic properties of spin valves with diluted ferromagnet as a spacer: model calculations and experimental investigation Yu.O. Tykhonenko, **I.M. Kozak**, Yu.O. Savina, V.A. Pashchenko, A.F. Kravets, A.I. Tovstolytkin // Proceedings of the X International Conference “Electronics and Applied Physics”, October 22 – 25, Kyiv, Ukraine, 2014. – P. 36 – 37.

13. **Козак І.М.** Дослідження параметрів міжшарової обмінної взаємодії в магнітних багат шарових наноструктурах методом феромагнітного резонансу / І.М. Козак, А.Ф. Кравець, Д.М. Поліщук, В.О. Голуб // Матеріали науково-технічної конференції “Фізика, електроніка і електротехніка.: 2015”. 20 – 25 Квітня, 2015, Суми. – 208 с. – С. 134.

АНОТАЦІЯ

Козак І. М. Термомагнітне керування обмінними взаємодіями в магнітних багат шарових та гранульованих плівкових наноструктурах. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.11 – магнетизм. – Інститут магнетизму НАН України та МОН України, Київ, 2015.

У дисертаційній роботі комплексно досліджено закономірності прояву міжшарових обмінних взаємодій в багат шарових наноструктурах через прошарки розбавлених феромагнетиків та міжгранульних обмінних взаємодій в магнітних наногранульованих структурах з різним типом провідності матриці. Основні результати отримані на основі магнітометричних та резонансних вимірювань у комплексі з феноменологічним моделюванням. У багат шарових наноструктурах $F_1/f/F_{2pin}$ встановлено залежність обміну між феромагнітними шарами від магнітного стану слабомагнітного прошарку, його концентрації та

товщини та визначено параметри управління взаємодією такі, як магнітне поле або температура. З використанням магніторезистивних вимірювань проаналізовано магнітний стан плівок розбавлених ферромагнітних сплавів Ni-Cu та визначено критичну концентрацію фазового переходу з ферромагнітного у парамагнітний стан. Для наногранульованих плівок встановлено залежність величини обміну та порогу його виникнення від типу провідності немагнітної матриці та концентрації магнітних гранул.

Ключові слова: магнітна багатошарова наноструктура, магнітна наногранульована плівка, обмінна взаємодія, розбавлений ферромагнетик, намагніченість, температура Кюрі, фазовий перехід.

АННОТАЦІЯ

Козак І. М. Термомагнитное управление обменными взаимодействиями в магнитных многослойных и гранулированных пленочных наноструктурах. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – магнетизм. – Институт магнетизма НАН Украины и МОН Украины, Киев, 2015.

В диссертационной работе комплексно исследованы закономерности проявления межслойных обменных взаимодействий в многослойных наноструктурах через слои разбавленных ферромагнетиков и межгранульных обменных взаимодействий в магнитных наногранулированных структурах с различным типом проводимости немагнитной матрицы. Объекты исследований могут найти широкое применение в качестве элементов различных устройств спинтроники.

Магнитные многослойные наноструктуры с термомагнитным переключением и магнитные наногранулированные структуры с разным типом проводимости немагнитной матрицы изготовлены методом магнетронного распыления и электронно-лучевого испарения, соответственно. Ключевым элементом многослойной пленки есть слабомагнитная прослойка NiCu – f , которая разделяет два внешних слоя сильных ферромагнетиков Ru – F_1 и CoFe – F_{2pin} . Температура Кюри NiCu находится в области комнатной, что важно для практической цели. Гетерогенные структуры представляют собой наногранулы ферромагнитного материала Ru диспергированы в немагнитную матрицу металлическую или металлодиэлектрическую.

Описаны термомагнитные эффекты в обменно-связанной трехслойной структуре $F_1/f/F_{2pin}$ с использованием феноменологической модели, в рамках которой установлено, что на границах сильных ферромагнитных слоев со слоем слабого ферромагнетика F_1/f и f/F_{2pin} происходит подмагничивание интерфейсных областей слоев слабого ферромагнетика. Также продемонстрировано зависимость переключения магнитных моментов

внешних ферромагнитных слоев от температуры.

Методом магнитометрических измерений исследовано влияние межслойного обменного взаимодействия на магнитные свойства многослойных пленок. Сила обменного взаимодействия между слоями шаров F_1 и F_{2pin} при низких температурах ($T = 5$ К) увеличивается практически линейно с увеличением количества Ni в прослойке Ni_xCu_{100-x} .

На основе экспериментально полученных полевых и температурных зависимостей намагниченности многослойной структуры продемонстрировано термомагнитное управление межслойным обменным взаимодействием в такой структуре. При приложении небольшого внешнего магнитного поля происходит переключение упорядочивания магнитных моментов слоев F_1 и F_{2pin} с параллельного в антипараллельное из-за исчезновения прямого ферромагнитного обмена между слоями, при переходе через точку Кюри для разбавленного сплава NiCu. Небольшие изменения температуры способствуют большим изменениям температуры фазового перехода.

На основе резонансных исследований показано зависимость обменного взаимодействия от толщины слабомагнитной прослойки и концентрации. Уменьшая толщину и увеличивая концентрацию магнитной компоненты Ni в слабомагнитной прослойке f можно увеличивать интенсивность обменного взаимодействия.

При малых концентрациях магнитных включений намагниченность гранулированных структур с любым типом матрицы крайне незначительна, магнитные гранулы находятся в суперпарамагнитном состоянии. Вследствие анализа результатов резонансных исследований, определены оптимальные концентрации магнитных компонент в образцах, обеспечивающие появление межгранульного обменного взаимодействия. В образцах с металлической матрицей при концентрации магнитной гранулы Ru $x \approx 0,18$ возникают признаки магнитного упорядочения, что приводит к появлению обмена между гранулами, напротив, в пленках с металлодиэлектрической при $x \approx 0,33$. Коллективное поведение ансамбля наногранул в металлодиэлектрических пленках становится существенным только при достижении порога структурной перколяции. На основе экспериментальных магнитных и феноменологических модельных исследований определен механизм непрямого обмена. Установлено, что в материалах с металлической матрицей между магнитными моментами наногранул существует дополнительный корреляционный механизм, обусловленный косвенным обменным взаимодействием через электроны зоны проводимости. Величина эффективного поля обмена магнитных гранул характеризуется значительно большей величиной, чем в наногранулированных материалах с диэлектрической средой.

Ключевые слова: магнитная многослойная наноструктура, магнитная наногранулированная пленка, обменное взаимодействие, разбавленный ферромагнетик, намагниченность, температура Кюри, фазовый переход.

ABSTRACT**Kozak I. M. Thermomagnetic control of the exchange interactions in magnetic multilayer and granular film nanostructures. – Manuscript.**

Thesis for a Doctor of Philosophy degree (Ph. D.) in Physics and Mathematics on specialty 01.04.11 – Magnetism. – Institute of Magnetism, the National Academy of Sciences of Ukraine and Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2015.

A complex study of manifestation of the interlayer exchange interactions in multilayered nanostructures through diluted ferromagnetic layers and the interparticle exchange interactions in heterogeneous structures with different types of conductivity matrix has been conducted in the thesis. The main results of investigations have been obtained with the use of magneto metric and resonance measurements, in complex with the phenomenological modeling. The dependence of exchange between the ferromagnetic layers through a weakly magnetic layer, of its thickness and concentration have been established in multilayered nanostructures $F_1/f/F_{2pin}$ and the parameters for control of interaction, such as magnetic field or temperature have been determined for them. The magnetic state of free film NiCu has been analyzed and the critical concentration of phase transition from ferromagnetic to paramagnetic state measurements has been defined using the magnetoresistive. The dependence of the exchange value and its threshold of appearance from the conductivity type of non-magnetic matrix and concentration of magnetic granules have been established for the nanogranular films.

Key words: magnetic multilayered nanostructure, magnetic nanogranular film, exchange interaction, diluted ferromagnetic, magnetization, Curie temperature, phase transition.

Підписано до друку 17.09.2015. Формат 60×84/16. Гарн. Тип Таймс.
Пап. офс. № 1. Друк різнографічний. Ум. Друк. Арк. 0,9. Ум. Фарбо-відб. 0,9.
Обл.-вид.арк. 0,9. Тираж 100 прим. Зам. № 83

Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України.
Україна, 03680, МСП, Київ-142, бульв. академіка Веєрнадського, 36.

Поліграфічна дільниця
Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України.
Україна, 03680, МСП, Київ-142, бульв. академіка Веєрнадського, 36.