

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

**КРАВЕЦЬ** Анатолій Федорович



УДК 539.2; 536.42; 538.22

**МАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ БАГАТОШАРОВИХ  
НАНОСТРУКТУР З ТЕМПЕРАТУРНО ЗАЛЕЖНОЮ  
МІЖШАРОВОЮ ОБМІННОЮ ВЗАЄМОДІЄЮ**

01.04.11 – магнетизм

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора фізико - математичних наук

Київ – 2021

Дисертацією є наукова доповідь за сукупністю наукових статей за науковою тематикою.

Робота виконана у відділі фізики тонких плівок Інституту магнетизму НАН України та МОН України.

**Офіційні  
опоненти:**

доктор фізико-математичних наук, професор,  
**Васильєв Михайло Олексійович**,  
Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України,  
головний науковий співробітник

доктор фізико-математичних наук, професор,  
**Пащенко Олексій Валентинович**,  
Донецький фізико-технічний інститут імені О.О. Галкіна  
НАН України, провідний науковий співробітник

доктор фізико-математичних наук, професор,  
**Семенько Михайло Петрович**,  
Київський національний університет імені Тараса  
Шевченка, професор кафедри фізики металів

Захист відбудеться 13 травня 2021 р. о 14-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.248.01 Інституту магнетизму Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України за адресою: 03142, м. Київ, бульвар академіка Вернадського, 36-б.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту металофізики імені Г. В. Курдюмова Національної академії наук України за адресою: 03142, м. Київ, бульвар академіка Вернадського, 36, та на сайті: <http://ukr.imag.kiev.ua>

Автореферат розісланий 12 квітня 2021 р.

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

 Л. Є. Козлова

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної проблеми фізики сучасного магнетизму – розробці нових принципів ефективного управління магнітними станами багатошарових наноструктур, перспективних для їх подальшого практичного застосування в області спінтроніки.

Магнітні багатошарові наноструктури складають основу сучасних спінтронних пристроїв різноманітного призначення і наразі інтенсивно досліджуються. Зважаючи на характерні товщини магнітних шарів і немагнітних прошарків в багатошарових наноструктурах міжшарові обмінні взаємодії різного типу в таких наноструктурах стають помітними і відіграють вирішальну роль в формуванні їх магнітних властивостей. Міжшарові обмінні взаємодії такі, як пряма феромагнітна, непряма осцилююча, магнітостатична Неєлівська, а також обмінна взаємодія на межі поділу феромагнетик - антиферомагнетик відіграють домінуючу роль в магнітному упорядкуванні в шаруватих наноструктурах. Ці обмінні взаємодії, як правило, є фіксованими і не можуть бути змінені після виготовлення багатошарових наноструктур. Енергії цих взаємодій пропорційні намагніченості феромагнітних шарів і слабо змінюються при невеликих змінах температури в біля привабливих з точки зору практичного застосування температур, наприклад трохи вище кімнатної. На практиці дуже важливо мати багатошарові структури, у яких міжшаровий обмін не фіксований, а ним можна керувати – вмикати і вимикати шляхом зміни зовнішнього параметра – температури, що є сприятливим фактором для створення нових спінтронних пристроїв на основі термо-магнітного перемикавання.

В роботі представлено новий вид міжшарової обмінної взаємодії – температурно-контрольований обмін між шарами сильних феромагнетиків через прошарок слабкого розбавленого феромагнетика, магнітний стан якого дуже залежить від температури і впливає на обмін між шарами сильних феромагнетиків. В роботі досліджено магнітні багатошарові плівкові наноструктури, які складаються із суцільних шарів сильних і слабких металевих феромагнетиків, немагнітних металів, антиферомагнетиків і діелектриків товщиною від долей нанометрів до декількох нанометрів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота над дисертацією була виконана у відділі фізики плівок Інституту магнетизму Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України у рамках наступних науково-дослідних робіт (НДР):

- *“Наноструктуровані магнітні композити для систем термоелектронного керування та термостабілізації”*, відомча тема НАН України, 2020-2021 рр., № ДР 0120U100457;
- *“Магнітні багатошарові наноструктури на основі антиферомагнетиків для елементів терагерцової спінтроніки”*, відомча тема НАН України, 2018-2020 рр., № держреєстрації (ДР) 0118U003265;

- “Магнітні наноструктури з термоелектронним керуванням магнітними станами для застосування в спінтроніці”, відомча тема НАН України, 2015-2017 рр., № ДР 0115U000974;
- “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 рр., відомча тема НАН України, № ДР 0112U001010;
- “Дослідження резонансних та нерезонансних явищ в композитних магнетиках з контрольованою міжшаровою взаємодією”, 2017-2018 рр., договір 17ДФ052-02С1 від 25.09.2017 р. з Київським національним університетом імені Тараса Шевченка та НАН України, № ДР 0118U004760;
- “Спінова динаміка та дисипативні процеси в наноструктурованих матеріалах надшвидкісної антиферомагнітної спінтроніки”, НДР № 7Ф Державної організації “Відділення цільової підготовки КНУ ім. Т. Шевченка при НАН України”, 2017–2018 рр., № ДР 0118U003794;
- “Розробка спінтронних нанорозмірних пристроїв з термічно керованими магнітними, електричними і магнітотранспортними властивостями” Цільової комплексної програми фундаментальних досліджень НАН України “Фундаментальні проблеми наноструктурних систем, наноматеріалів, нанотехнологій”, 2010-2014 рр., Договір № 29/10-14-Н, № ДР 0110U004804;
- “Міжшарові взаємодії в магнітних наноструктурах з товщинами, співрозмірними з їх характеристичними параметрами” Цільової комплексної програми фундаментальних досліджень НАН України “Фундаментальні проблеми наноструктурних систем, наноматеріалів, нанотехнологій”, 2010-2014 рр., Договір № 22/10-14-Н, № ДР 0114U002748.

В цих роботах здобувач був відповідальним виконавцем. Головні результати дисертації лягли в основу наукових звітів за цими роботами.

**Метою дослідження** було встановлення закономірностей проявів міжшарових прямих і непрямих обмінних взаємодій в магнітних багатошарових наноструктурах з прошарками розбавлених феромагнітних сплавів у відповідності до їх температурно-залежних магнітних станів, а також встановлення закономірностей проявів динамічних обмінних взаємодій в багатошарових наноструктурах на основі натуральних і синтетичних антиферомагнетиків.

**Завдання дослідження:**

- виготовлення магнітних багатошарових наноструктур з температурно-залежною міжшаровою прямою і непрямую обмінними взаємодіями та багатошарових наноструктур на основі антиферомагнетиків з динамічною обмінною взаємодією;
- розробка фізичних основ температурного керування магнітними станами розроблених багатошарових наноструктур;
- дослідження впливу температурно-залежних міжшарових обмінних взаємодій в розроблених багатошарових наноструктурах на їх статичні і динамічні магнітні властивості;

- проведення феноменологічних модельних розрахунків для аналізу отриманих експериментальних даних і встановлення основних фізичних закономірностей поведінки магнітних властивостей багатошарових наноструктур;
- розробка спітронних пристроїв, побудованих на основі досліджених багатошарових наноструктур, з температурно індукованим перемиканням магнітних станів.

**Об'єкт дослідження:** магнітні багатошарові наноструктури з температурно залежними міжшаровими обмінними взаємодіями між шарами сильних феромагнетиків через прошарки слабких розбавлених феромагнетиків та магнітні багатошарові наноструктури на основі натуральних і синтетичних антиферомагнетиків з динамічними обмінними взаємодіями.

**Предмет дослідження:** температурно залежна міжшарова обмінна взаємодія (пряма та непряма) між шарами сильних феромагнетиків, розділених прошарком слабого розбавленого феромагнетика; залежність магнітних властивостей багатошарових наноструктур від магнітного стану прошарку розбавленого феромагнітного сплаву.

**Методи дослідження.** Магнітні багатошарові наноструктури були виготовлені методом магнетронного осаджування з використанням обладнання AJA Orion 8-Target Deposition System. 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 моделювання.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в наступному:

1. Запропоновано та реалізовано новий тип міжшарової обмінної взаємодії в магнітних багатошарових наноструктурах – температурно-залежний обмін між шарами сильних феромагнетиків через прошарок розбавленого слабоферомагнітного сплаву.
2. Запропоновано та реалізовано модифікований спіновий вентиль з прошарком розбавленого феромагнітного сплаву як температурно-чутливий спітронний пристрій - термомагнітний Кюрі-перемикач.
3. Виявлено, що в обмінній взаємодії між шарами сильних феромагнетиків через прошарок розбавленого слабого феромагнітного сплаву визначальну роль відіграє ефект підмагнічування (*proximity effect*) на інтерфейсі між сильним і слабким феромагнетиками, який спричиняє неоднорідний розподіл намагніченості в прошарку розбавленого феромагнітного сплаву та призводить до сильної нелінійної залежності міжшарового обміну від товщини прошарку і концентрації магнітної компоненти в ньому.
4. Встановлено, що в плівках розбавлених феромагнітних сплавів, осаджених методами магнетронного напорошування і електронно-променевого

осаджування, спостерігається магнітне композиційне розшарування, спричинене магнітоіндукованим ефектом в процесі осаджування плівок.

5. З метою послаблення ефекту підмагнічування на інтерфейсі між сильним і слабким феромагнетиками та покращення чіткості термомагнітного перемикачання в Кюрі-перемикачі синтезовано прошарок розбавленого феромагнітного сплаву з градієнтним розподілом концентрації магнітної компоненти по товщині прошарку.
6. Запроновано та створено температурно чутливий магнітний тунельний контакт, як прототип елемента магнітної пам'яті, з термомагнітним перемиканням магнітних і резистивних станів.
7. Запропоновано механізм температурного керування характером міжшарового обміну в магнітних багатошарових наноструктурах з температурно залежною обмінною взаємодією – із прямого обміну феромагнітного типу (синтетичний феромагнетик) в непрямий обмін антиферомагнітного типу (синтетичний антиферомагнетик, чи синтетичний феримагнетик).
8. Виявлено кероване температурою анізотропне згасання магнітних динамічних процесів в термомагнітному перемикачі.
9. Запропоновано механізм та експериментально досліджено гігантський магнітокалоричний ефект, зумовлений непрямим обміном в магнітних багатошарових структурах з прошарками розбавлених феромагнітних сплавів в парамагнітному стані.
10. Запропоновано методику дослідження магнітних властивостей прошарку слабого (розбавленого) феромагнетика на підставі обмінної взаємодії з шарами сильних феромагнетиків.

**Практичне значення отриманих результатів.** Отримані в роботі нові наукові результати розширюють уявлення про природу фізичних явищ в магнітних багатошарових наноструктурах. В результаті реалізації комплексного підходу у вивченні фізичних основ управління магнітними властивостями багатошарових наноструктур з температурно керованим міжшаровим обміном були розроблені практичні рекомендації та створені окремі функціональні елементи температурно керованих спінтронних пристроїв.

**Особистий внесок здобувача** полягає у виборі напрямку, об'єктів, формулюванні мети та постановці задач дослідження, організації і виконанні експериментальних досліджень, підготовці запитів на отримання фінансування науково-дослідних робіт за темою дисертації та підготовці публікацій за результатами досліджень. В дисертації викладені результати досліджень, виконаних здобувачем самостійно та у співробітництві з іншими авторами. Здобувач безпосередньо брав участь у виконанні всіх етапів цього дослідження: розробці підходів та методів розв'язання поставленої задачі, приготуванні зразків, інтерпретації, аналізі та узагальненні всіх отриманих результатів, написанні наукових статей та підготовці доповідей на конференціях. Автору особисто належать: розробка технології і виготовлення досліджуваних зразків; постановка задачі щодо вивчення їх магнітних властивостей; виконання частини

відповідних модельних розрахунків і значна роль в інтерпретації всіх отриманих результатів.

У проведенні експериментальних і теоретичних робіт, обробці отриманих результатів та оформленні друкованих робіт разом із автором брали участь наукові співробітники та аспіранти Інституту магнетизму Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України: проф. А. М. Погорілий, проф. О. І. Товстолиткін, проф. Ю. І. Джежеря, д.ф.-м.н. В. О. Голуб, к.ф.-м.н. Д. М. Поліщук, к.ф.-м.н. О. Ю. Салюк, к.ф.-м.н. Т. І. Полек, к.ф.-м.н. Ю. О. Тихоненко-Поліщук, к.ф.-м.н. І. М. Козак; аспірант В. Ю. Боринський; аспірант Д. Д. Яремкевич. Ряд експериментів та вимірів характеристик досліджуваних матеріалів виконано у співпраці з науковцями інших наукових установ України та за кордоном: (а) Інституту металофізики ім. Курдюмова НАН України - проф. Ю. В. Кудрявцевим, к.х.н. В. В. Трачевським, н.с. А.К. Мельником; А. М. Тимошевським (першопринципні розрахунки магнітних властивостей плівок розбавлених феромагнетиків і багат шарових наноструктур); (б) Королівського технологічного інституту (Стокгольм, Швеція) - проф. В. Коренівським, PhD E. Holmgren; PhD S. Andersson; PhD В. Коор; (в) Центру квантової спітроніки Норвезького університету науки і технології - проф. А. Brataas; PhD А. Kamra. Автор висловлює подяку всім колегам за активну участь у проведенні досліджень за темою дисертації, в обговоренні та підготовці матеріалів до публікацій.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення роботи були висвітлені усно і стендово та обговорені на міжнародних наукових конференціях:

- International Conference “Nanotechnology and Nanomaterials (NANO-2020)”, Lviv, 26–29 August 2020.
- The Joint European Magnetic Symposia (JEMS’2019), 26-30 August 2019, Uppsala, Sweden.
- The 2019 IEEE 9th International Conference on Nanomaterials: Applications & Properties (NAP-2019), Odessa, Ukraine, September 15-20, 2019.
- The International Research and Practice Conference: Nanotechnology and Nanomaterials (NANO-2018), 27-30 August 2018, Kyiv, Ukraine.
- The 2018 IEEE 8th International Conference on Nanomaterials: Applications & Properties (NAP-2018), September 9-14 2018, Zatoka, Ukraine.
- The 61st Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, October 3 – November 4, 2016, New Orleans, Louisiana, USA.
- The X international conference “Electronics and Applied Physics”, 22-25 October, 2014, Kyiv, Ukraine, Taras Shevchenko National University of Kyiv Faculty of Radio Physics, Electronics and Computer System.
- The IEEE International Magnetism Conference, INTERMAG Europe 2014, Dresden, Germany, May 4-8, 2014.
- The IX International Conference “Electronics and Applied Physics”, 23 - 26 October 2013, Kyiv, Ukraine, Taras Shevchenko National University of Kyiv Faculty of Radio Physics.
- Joint MMM-Intermag Conference, January 14-18, 2013, Chicago, USA.

Здобувач доповідав результати дисертації на чисельних наукових семінарах і щорічних наукових зборах Інституту магнетизму Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України.

**Публікації.** Результати дисертації викладено у 24 статтях у наукових фахових журналах, з яких 15 статей опубліковано у журналах, віднесених до першого Q1 і другого Q2 квантилів відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports), та в 29 тезах міжнародних конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація підготовлена у вигляді наукової доповіді за сукупністю статей. До основної частини дисертації включено 24 статті у фахових наукових журналах, які згруповані в 6 розділів. Загальний обсяг дисертації – 280 сторінок, з яких основна частина складає 223 сторінок.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Дисертацією є сукупність наукових статей за науковою тематикою, в яких приведено детальний аналіз сучасного стану наукової проблеми та запропоновано експериментальне і теоретичне вирішення поставленої проблеми.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, вказано зв'язок роботи з науковими програмами та темами, сформульовано мету і задачі дослідження, визначено наукову новизну та практичну цінність роботи, представлено апробацію результатів роботи, приведено перелік публікацій за темою дисертації.

**Перший розділ** “*Магнітні властивості плівок розбавлених феромагнітних сплавів  $Ni_xCu_{100-x}$* ” присвячений дослідженню концентраційних, польових і температурних залежностей статичних і динамічних магнітних властивостей плівок розбавлених феромагнітних сплавів  $Ni_xCu_{100-x}$ , в широкому діапазоні концентрацій, осаджених на кремнієві підкладки методами магнетронного розпорошування і електронно-променевого осаджування. Плівки  $Ni_xCu_{100-x}$  використані в подальшому як слабوماгнітні прошарки з низькою, порівняно із сильними феромагнетиками, температурою Кюрі в магнітних багатошарових наноструктурах з температурно керованою міжшаровою обмінною взаємодією - якості температурно чутливих елементів, що регулюють обмін між шарами сильних феромагнетиків.

В *підрозділі 1.1* приведені результати експериментального дослідження методом феромагнітного резонансу магнітних властивостей  $Ni_xCu_{100-x}$  плівок, осаджених методом магнетронного розпорошування у діапазоні атомних концентрацій 70 ат. %  $< x < 10$  ат. % та методом вакуумного електронно-променевого осаджування в діапазоні концентрацій 50 ат. %  $< x < 10$  ат. %. Магнітоіндуковане розділення фаз призводить до відхилення від лінійного закону концентраційної залежності температури Кюрі плівок  $Ni_xCu_{100-x}$  сплаву, порівняно із масивним сплавом такого ж вмісту (рис. 1, а), що слід враховувати при використанні плівок цих сплавів в магнітних багатошарових наноструктурах з температурно залежним обміном. Намагніченість плівок



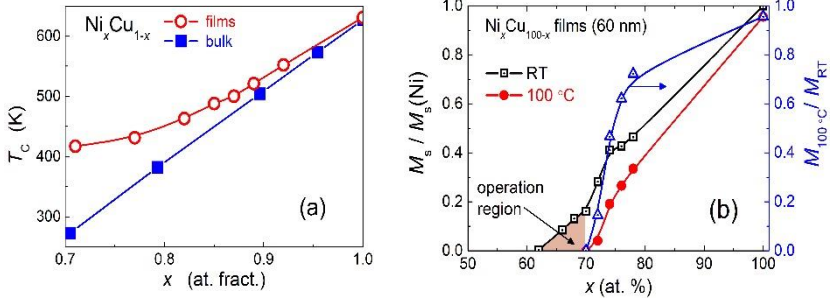


Рис. 1. (а) Концентраційні залежності температури Кюрі для  $\text{Ni}_x\text{Cu}_{1-x}$  сплавів в масивному і тонкоплівкових вигляді. (б) Концентраційні залежності нормованої намагніченості насичення плівок  $\text{Ni}_x\text{Cu}_{100-x}$ , при кімнатній температурі (RT) і 100 °С. Трикутні символи показують відношення намагніченості при цих двох температурах.

$\text{Ni}_x\text{Cu}_{100-x}$  монотонно спадає із зменшенням  $x$  і зникає при кімнатній температурі поблизу  $x = 60$  ат. % (рис. 1, б). Плівки при цьому стають парамагнітними.

Підрозділ 1.2 присвячений дослідженню спінзалежного розсіювання та ефекту магнітної близькості в багатошарових структурах  $\text{Co}/\text{Ni}_x\text{Cu}_{1-x}/\text{Co}$  для виявлення порогу зникнення слабого магнетизму в розбавленому феромагнітному сплаві Cu-Ni. Були досліджені магнітотранспортні властивості та феромагнітний резонанс багатошарових наноструктур  $\text{Co}/\text{Ni}_x\text{Cu}_{1-x}/\text{Co}$  з гігантським магнітоопором (ГМО) із різною концентрацією Ni в прошарку Cu-Ni. Експериментально виявлений перехід від магнітного до діамагнітного стану атомних магнітних моментів Ni в матриці Cu при концентраціях нижче 15 ат. % Ni. Зі збільшенням концентрації атоми Ni перетворюються на центри спінового розсіювання, що експериментально спостерігається як ступінчаста зміна ГМО на

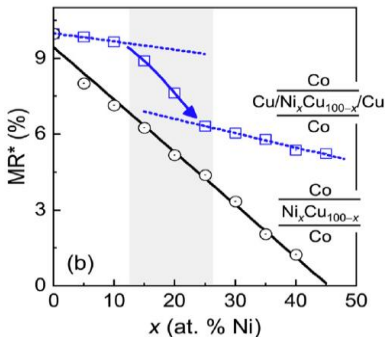


Рис. 2. Концентраційні залежності магнітоопору  $\text{Co}/\text{Ni}-\text{Cu}/\text{Co}$  структур:  $\text{MR} = [\rho_{\text{max}}(x) - \rho_{\text{min}}(x)] / \rho_{\text{min}}(0)$ , де  $\rho_{\text{max}}(x)$  і  $\rho_{\text{min}}(x)$  – максимальні і мінімальні значення питомого опору в залежностях  $\rho(H)$  для даної концентрації  $x$ .

концентраційних залежностях для вказаних багатошарових наноструктур (рис. 2). Така поведінка спостерігається в структурах  $\text{Co}/\text{Cu}/\text{Ni}_x\text{Cu}_{1-x}/\text{Cu}/\text{Co}$  з градієнтним прошарком, в якому пригнічений ефект підмагнічування з боку Co на  $\text{Ni}_x\text{Cu}_{1-x}$ . Для структур  $\text{Co}/\text{Cu}-\text{Ni}/\text{Co}$  із рівномірно легуваними прошарками ГМО монотонно зменшується зі збільшенням вмісту Ni, що вказує на те, що атоми Ni є весь час магнітними і діють як центри спінового розсіювання у всьому досліджуваному діапазоні концентрацій Ni. Ми пояснюємо різницю в спостережуваній поведінці ГМО для різних прошарків сильним ефектом магнітної близькості в рівномірних прошарках, який ефективно пригнічується в градієнтних прошарках. Розроблений

підхід може бути корисним для дослідження слабого магнетизму в плівках розбавлених феромагнітних сплавів, який неможливо досліджувати іншими методами.

**Другий розділ** “Магнітні статичні властивості багатошарових наноструктур з температурно залежною прямою міжшаровою обмінною взаємодією” присвячений дослідженню польових і температурних залежностей намагніченості Кюрі-перемикачів (КП)  $F_1/f/F_{2\text{ pin}}$  – магнітних тришарових наноструктур спін-вентильного типу з температурно керованою прямою обмінною взаємодією феромагнітного типу між шарами сильних феромагнетиків  $F_1$  і  $F_{2\text{ pin}}$  через прошарок слабого феромагнетика  $f$ . Тут  $F_1$  – вільний шар пермалою  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  (10 нм) з одновісною магнітною анізотропією;  $F_{2\text{ pin}}$  – шар закріпленого феромагнетика  $\text{Co}_{50}\text{Fe}_{50}$  (5 нм) /  $\text{Mn}_{80}\text{Ir}_{20}$  (12 нм) з однаковою магнітною анізотропією, спричиненою обмінним закріпленням  $\text{Co-Fe}$  з антиферомагнетиком  $\text{Mn-Ir}$ ;  $f$  – прошарок слабого (розбавленого) феромагнітного сплаву  $\text{Ni}_x\text{Cu}_{100-x}$  ( $x, d$ ) з різною товщиною ( $d = 3; 4,5; 6; 7,5; 9$  нм) і різною температурою Кюрі, залежною від концентрації  $\text{Ni}$  в сплаві ( $x = 0, 40, 48, 54, 62, 70$  ат. %).

В *підрозділі 2.1* приведені результати досліджень польових і температурних залежностей намагніченості КП залежно від товщини  $d_f$  і температури Кюрі  $T_C^f$  прошарку  $f$ . Присутність чи відсутність обмінної взаємодії між шарами  $F_{2\text{ pin}}$  і  $F_1$  при кімнатній температурі залежить від  $T_C^f$  прошарку  $f$ .

Найбільш характерні петлі перемагнічування КП при кімнатній температурі на прикладі КП з  $d_f = 6$  нм і  $x = 36, 52$  і  $70$  ат.% приведені на рис. 3, а. У випадку слабкої міжшарової  $F_{2\text{ pin}}-F_1$  взаємодії (*partial coupling*) при малих значеннях  $x$  (35 і 52 ат. %) петлі складаються з двох частин, одна з яких (при більших від’ємних полях) відповідає перемагнічуванню закріпленого шару  $F_{2\text{ pin}}$  з обмінним полем  $H_{\text{eb}}$ , а інша (при менших полях) – перемагнічування вільного шару  $F_1$  з обмінним полем  $H_{\text{ec}}$ . У випадку сильної міжшарової взаємодії (*full coupling*) при великих значеннях  $x$  (70 ат. %) дві частини петель зливаються і структура веде себе, як одне ціле. Концентраційні залежності обмінних полів  $H_{\text{eb}}$  і  $H_{\text{ec}}$  при кімнатній температурі для КП з  $d_f = 6$  нм приведені на рис. 3, б.

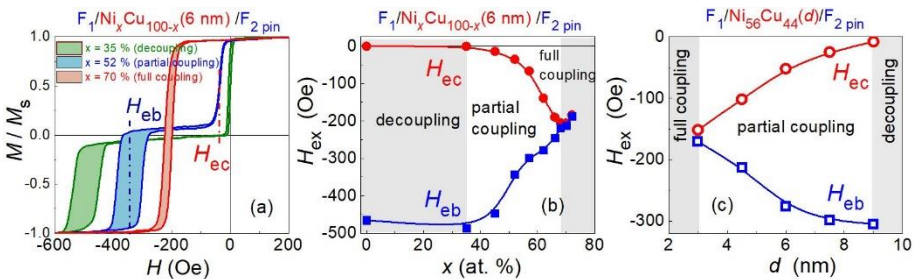


Рис. 3. (а) Типові петлі перемагнічування КП. (б) Концентраційні залежності обмінних полів  $H_{\text{ec}}$  і  $H_{\text{eb}}$ , відповідно для  $F_1$  і  $F_{2\text{ pin}}$  шарів КП з  $d = 6$  нм. (с) Залежності  $H_{\text{ec}}$  і  $H_{\text{eb}}$  від товщини  $d$  прошарку  $\text{Ni}_{56}\text{Cu}_{44}$ .

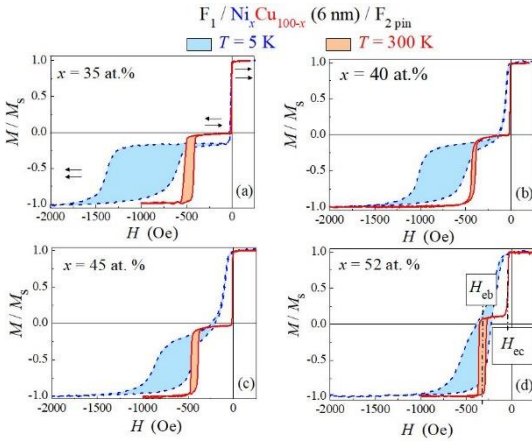


Рис. 4. Петлі перемагнічування для КП, виміряні при температурах 300 К і 5 К: (a)  $x = 35$  ат.%; (b)  $x = 40$  ат.%; (c)  $x = 45$  ат.%; (d)  $x = 52$  ат.%. Стрілками вказані орієнтації магнітних моментів шарів  $F_1$  і  $F_{2 \text{ pin}}$

$Ni_xCu_{100-x}$  прошарку ( $x = 35$  і  $40$  ат.%) повинен ідеально перемагнічуватись поблизу нульового поля, але на практиці спостерігається невеликий зсув мінорної частини петлі,  $H_{ec}$ , через обмінну взаємодію шару  $F_1$  з шаром  $F_{2 \text{ pin}}$ . Величина  $H_{ec}$  зростає при зменшенні температури (рис. 4). КП відрізняється від звичайного спінового вентиля  $F_1/Cu(6 \text{ nm})/F_{2 \text{ pin}}$  наявністю прямої обмінної взаємодії між шарами  $F_1$  і  $F_{2 \text{ pin}}$  через прошарок розбавленого феромагнітного сплаву Ni-Cu, що приводить появи  $H_{ec}$ . Петлі перемагнічування характеризуються обмінними полями  $H_{ec}$  і  $H_{eb}$  (рис. 4, d), де  $H_{ec}$  – 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  $T = 300 \text{ K}$  і  $5 \text{ K}$ , через збільшення обмінної взаємодії спостерігається монотонне зближення  $H_{ec}$  і  $H_{eb}$ , при цьому за абсолютною величиною  $H_{ec}$  зростає, а  $H_{eb}$  зменшується (рис. 5, a).

Величиною, яка характеризує силу обмінної взаємодії між шарами  $F_1$  і  $F_{2 \text{ pin}}$  через прошарок  $Ni_xCu_{100-x}$ , при заданій температурі, може служити різниця обмінних полів  $\Delta H_{ex} = H_{eb} - H_{ec}$  (рис. 5, b). Чим менше значення  $\Delta H_{ex}$ , тим сильніша міжшарова обмінна взаємодія. Сила міжшарової  $F_1 - F_{2 \text{ pin}}$

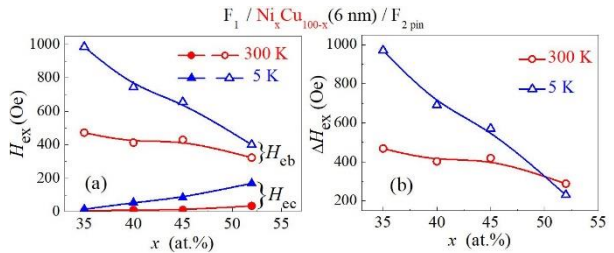


Рис. 5. Концентраційні залежності обмінних полів  $H_{eb}$  і  $H_{ec}$  (a), та їх різниці  $\Delta H_{ex}$  (b), відповідно для  $F_{2 \text{ pin}}$  і  $F_1$  шарів.

Залежності  $H_{ex}$  і  $H_{ec}$  від товщини  $d_f$  прошарку  $f$  для КП з  $x=56$  ат. % приведені на рис. 3, с.

На рис. 4 приведені петлі перемагнічування КП з  $x=35, 40, 45$  і  $52$  ат. % і  $d_f = 6 \text{ nm}$ , виміряні при температурах 300 К і 5 К. Петлі складаються з двох характерних частин, мінорної і мажорної, які виникають, відповідно, від перемагнічуванню “вільного”  $F_1$  і “закріпленого”  $F_{2 \text{ pin}}$  шарів. Шар  $F_{2 \text{ pin}}$  перемагнічується далеко від нульового поля через обмінну взаємодію з антиферомагнетиком. Вільний шар  $F_1$  при малих концентраціях Ni в

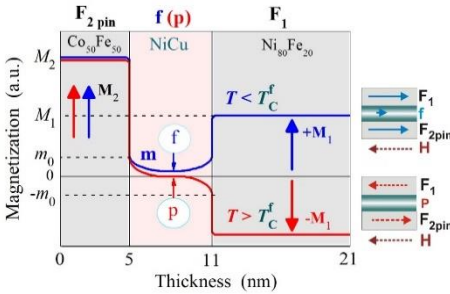


Рис. 6. Схема термомагнітного перемикання КП і розподіл намагніченості в його перетині при низькій ( $T < T_C^f$ ) і високій ( $T > T_C^f$ ) температурах.

детальну теоретичну модель КП і отримано аналітичні вирази для поля ефективного магнітного перемикання і його температурної залежності, враховано суттєво нелінійний профіль обмінної взаємодії і локальної намагніченості в перетині прошарку  $f$ . Проведено порівняння аналітичних результатів із результатами мікромагнітних розрахунків.

На рис. 6 схематично зображено процес термомагнітного перемикання КП і розподіл намагніченості в його перетині при температурах вище і нижче ефективної температури Кюрі  $T_C^f$  прошарку  $f$ . В невеликому магнітному полі  $H$ , прикладеному в напрямку, протилежному полю обмінного закріплення  $F_{2\text{pin}}$  ( $H \uparrow \downarrow H_{\text{eb}}, |H| < H_{\text{eb}}$ ), при переході прошарку  $f$  через його ефективну температуру Кюрі  $T_C^f$  із феромагнітного в парамагнітний стан, відповідно відбувається перехід КП із стану *синтетичного феромагнетика* з максимальним значенням намагніченості в стан *синтетичного антиферомагнетика* із мінімальним значенням намагніченості, тобто відбувається термо-магнітне перемикання КП.

Через ефект підмагнічування на інтерфейсах  $F_{2\text{pin}}/f$  і  $f/F_1$  розподіл намагніченості (і температури Кюрі) в перетині прошарку  $f$  є дуже неоднорідним, а ефективна температура Кюрі  $T_C^f$  прошарку суттєво перевищує температуру Кюрі матеріалу сплаву прошарку. Тому магнітне перемикання в КП здійснюється не при фіксованій температурі, а в діапазоні температур  $\Delta T$ .

З ростом температури при переході через точку Кюрі ( $T_C$ ) для розбавленого сплаву  $\text{Ni}_{35}\text{Cu}_{65}$  під дією прикладеного невеликого магнітного поля  $H$  в напрямку, протилежному полю обмінного закріплення шару  $F_{2\text{pin}}$  (в нашому випадку  $-10 \text{ E}$ ), відбувається перемикання магнітного моменту шару  $F_1$  в КП  $F_1/\text{Ni}_{35}\text{Cu}_{65}/F_{2\text{pin}}$  від паралельного до антипаралельного упорядкування відносно магнітного моменту шару  $F_{2\text{pin}}$  (рис. 7). З урахуванням рівності абсолютних значень магнітних моментів шарів  $F_1$  і  $F_{2\text{pin}}$  сумарна намагніченість КП

обмінної взаємодії при  $T = 5 \text{ K}$  зростає практично лінійно ( $\Delta H_{\text{ex}}$  зменшується) з ростом  $x$ .

В *підрозділі 2.2* аналітично та експериментально продемонстровано температурне управління міжшаровою обмінною взаємодією в КП. Досліджено в широкому температурному діапазоні магнітні статичні властивості КП, а також термомагнітне перемикання магнітних станів в них в залежності від ступеня немагнітного розбавлення прошарку  $f$ . Розвинуто

$F_1/\text{Ni}_{35}\text{Cu}_{65}/F_2$  pin  
при цьому  
прямує до нуля.  
Подібне  
перемикання  
було названо  
Кюрі  
перемиканням, а  
структура  
 $F_1/F_2$  pin –  
термомагнітним  
Кюрі-  
перемикачем. Як  
видно з рис. 7 б

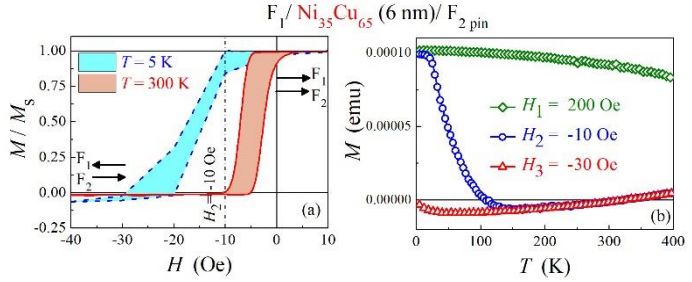


Рис. 7. Схема термо-магнітного перемикання КП  $F_1/\text{Ni}_{35}\text{Cu}_{65}/F_2$  pin. (а) Мінорні петлі перемагнічування вільного шару  $F_1$ . (б) Виміряні в різних прикладених полях  $H$  температурні залежності намагніченості КП.

термомагнітне перемикання в КП можливе тільки в діапазоні певних значень прикладеного магнітного поля, між обмінними полями часткових петель перемагнічування шару  $F_1$  при різних температурах (рис. 7, а).

При фіксованій товщині  $d$  і концентрації  $x$  прошарку  $f$  температура перемикання  $T_{tr}$  і чіткість перемикання (напівширина температурного інтервалу перемикання)  $dT_{tr}$  КП сильно залежать від величини прикладеного поля  $H$  (рис. 8).

Для прикладу, приведені на рис. 8 магнітні властивості КП  $F_1/\text{Ni}_{40}\text{Cu}_{60}(6 \text{ nm})/F_2$  pin.  $T_{tr}$  і  $dT_{tr}$  визначались шляхом про диференціювання і інтерполювання функціями Гауса температурних кривих намагніченості  $M(T)$  КП (рис. 8, с).  $T_{tr}$  зростає, а  $dT_{tr}$  зменшується із зменшенням

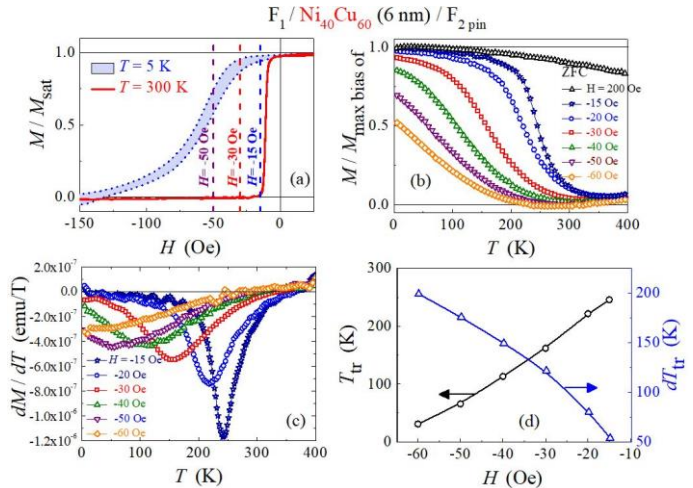


Рис. 8. Магнітні властивості КП  $F_1/\text{Ni}_{40}\text{Cu}_{60}/F_2$  pin. (а) Мінорні петлі перемагнічування шару  $F_1$  для  $T = 5 \text{ K}$   $300 \text{ K}$ . Пунктирними лініями позначені поля підмагнічування  $H$ . (б) Температурні залежності намагніченості, виміряні в різних полях  $H$ . (с) Перші похідні температурних кривих намагніченості. (д) Температури магнітного перемикання  $T_{tr}$  і напівширини температурного інтервалу перемикання  $dT_{tr}$ .

величини  $H$ . Подібна поведінка спостерігається і для КП з іншими  $x$ . Таким чином, змінюючи  $H$ , можна в широких межах змінювати як

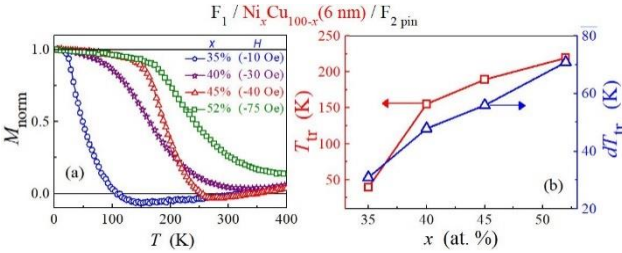


Рис. 9. (а) Температурні залежності намагніченості, виміряні в оптимізованих для кожного КП прикладених полях. (б) Концентраційні залежності температури термомагнітного перемикання  $T_{tr}$  і напівширини температурного інтервалу перемикання  $dT_{tr}$  КП з  $x = 35, 40, 45, 52$  ат. %.

При теоретичному описі термомагнітних ефектів в КП, була використана феноменологічна модель, в рамках якої вважалось, що на границях шарів сильних феромагнетиків із шаром слабого феромагнетика  $F_1/f$  і  $f/F_{2, pin}$  спостерігається інтенсивна обмінна взаємодія через електрони провідності. Ця взаємодія призводить до підмагнічування інтерфейсних областей шарів слабого феромагнетика  $f$  на інтерфейсах  $F_1/f$  і  $f/F_{2, pin}$ . Також було припущено, що модуль вектора намагніченості прошарку  $f$  на інтерфейсах  $F_1/f$  і  $f/F_{2, pin}$  досягає максимального значення  $m_0$ , а його напрямок збігається з напрямком намагніченості шарів  $F_1$  і  $F_{2, pin}$ .

Критичне магнітне поле поблизу кімнатної температури  $T_0$ , необхідне для перемагнічування КП із рівноважного стану (коли магнітні моменти всіх шарів паралельні) в антипаралельний стан, істотно залежить від температури прошарку  $f$  і може бути визначене із виразу (рис. 10):

$$H = \left( \delta m_0^2 \sqrt{(T - T_c^f)/T_0} \right) / \left( L \chi_0 M_1 \sinh \left( \frac{d}{\delta} \sqrt{(T - T_c^f)/T_0} \right) \right), \text{ де } d - \text{товщина прошарку } f;$$

$\chi_0 = C/T_0 \sim 10^{-3} \div 10^{-4}$  – магнітна сприйнятливості матеріалу прошарку  $f$  при  $T_0$ ;  $C$  – Кюрі константа матеріалу прошарку  $Ni_xCu_{100-x}$ :  $C = x C_{Ni}$ , де  $C_{Ni}$  – відповідна константа для  $Ni$ ,  $x$  – концентрація  $Ni$ ;  $\delta = \sqrt{\alpha C/T_0}$  – просторовий масштаб системи;  $\alpha$  – константа обмінної взаємодії,  $L$  – товщина вільного шару  $F_1$ .

Розраховані розподіли намагніченості всередині прошарку  $f$  для КП для паралельного ( $\varphi = 0$ ) і антипаралельного ( $\varphi = \pi$ ) впорядкування магнітних моментів зовнішніх феромагнітних шарів  $F_1$  і  $F_{2, pin}$  приведені на рис. 11, а.

На основі мікромагнітного моделювання магнітного перемикання в КП були розраховані дві складові намагніченості прошарку  $f$  при низькій температурі (5 К) (рис. 11, б) і при температурі вище ефективної температури Кюрі прошарку  $f$  (300 К) (рис. 11 с) при антипаралельній орієнтації магнітних моментів шарів  $F_1$  і  $F_{2, pin}$  в структурі. При низькій температурі складова уздовж легкої осі,  $m_x$ , (напрямок обмінного закріплення) має структуру стінки Блоха, з обертанням спінів у площині КП. Перпендикулярна до площини компонента  $m_y$

$T_{tr}$  так  $dT_{tr}$  в КП, при цьому малі зміни  $H$  (десятки О) призводять до великих змін  $T_{tr}$  (сотні К).

$T_{tr}$  і  $dT_{tr}$  залежать від концентрації  $x$  магнітної компоненти в прошарку  $f$  КП і зростають при її збільшенні (рис. 9) через збільшення міжшарової обмінної взаємодії в структурі.

максимальна в центрі прошарку ( $z = 0$ ). При збільшенні температури вище ефективної температури Кюрі  $T_C^f$  прошарку  $f$  (300 K) (рис. 11, с), останній стає парамагнітним і  $m_y$  прямує до нуля по всьому прошарку  $f$ , а  $m_x$  швидко зменшується уздовж легкої вісі, тобто відбувається термомагнітне перемикання. Таким чином, обмінну взаємодію в прошарку  $f$  із обмінним підмагнічуванням можна уявити як обмінну пружину типу блохівської стінки при низькій температурі, яка розривається всередині прошарку при перевищенні температури вище  $T_C^f$ .

Експериментально продемонстровано прошарок із градієнтним складом  $f^*/f/f^*$  і більш низькою концентрацією Ni в шарі  $f^*$  на інтерфейсах  $F_{2\text{ pin}}/f^*$  і  $f^*/F_1$ , порівняно із центральним шаром  $f$ , що дозволило суттєво зменшити ефект підмагнічування на інтерфейсах  $F_{2\text{ pin}}/f^*$  і  $f^*/F_1$  та покращити однорідність ефективного обміну через прошарок і покращити процес термомагнітного перемикання в КП.

На рис. 12 приведені нормовані температурні залежності намагніченості КП з однорідним (us1) прошарком  $\text{Ni}_{72}\text{Cu}_{28}$  (10 нм) і 20 нм (us2), і з градієнтним (gs) прошарком  $f^*/f/f^*$ , де  $f^*$  –  $\text{Ni}_{50}\text{Cu}_{50}$  (4 нм),  $f$  –  $\text{Ni}_{72}\text{Cu}_{28}$  (6 нм). Стрілками на

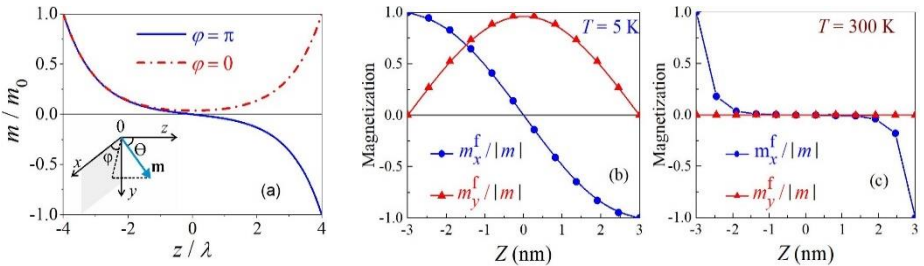


Рис. 11. (а) Розрахований розподіл намагніченості всередині прошарку  $f$  КП для паралельного ( $\varphi = 0$ ) і антипаралельного ( $\varphi = \pi$ ) впорядкування магнітних моментів зовнішніх феромагнітних шарів  $F_1$  і  $F_{2\text{ pin}}$ . Вісь  $Oz$  системи координат перпендикулярна до площини плівки КП, а зовнішнє магнітне поле  $\mathbf{H}$  направлено уздовж осі  $Ox$ , проти рівноважної намагніченості КП  $F_1/f/F_{2\text{ pin}}$ , коли магнітні моменти всіх шарів паралельні. Температура тут обрана такою, що міжшаровий обмін від наведеного феромагнетизму розривається в центрі прошарку  $f$ . (b) і (c) Дві складові намагніченості прошарку  $f$ , розраховані на основі мікромагнітного моделювання при  $T < T_C^f$  (5 K) і  $T > T_C^f$  (300 K) при антипаралельній орієнтації магнітних моментів шарів  $F_1$  і  $F_{2\text{ pin}}$ . Суцільними лініями показано припущення аналітичної теорії.

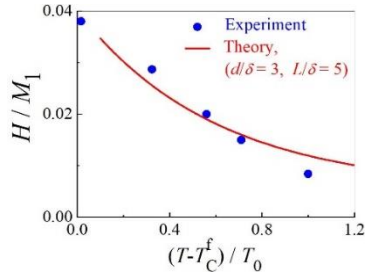


Рис. 10. Експериментальна (точки) і розрахована (лінія) температурні залежності магнітного поля перемикання термомагнітного КП  $F_1/\text{Ni}_{40}\text{Cu}_{60}/F_{2\text{ pin}}$ . Розрахунки проведені для параметрів  $\chi_0 = C/T_0 = 0.016$ ;  $m_0 / M_1 = 0,1$

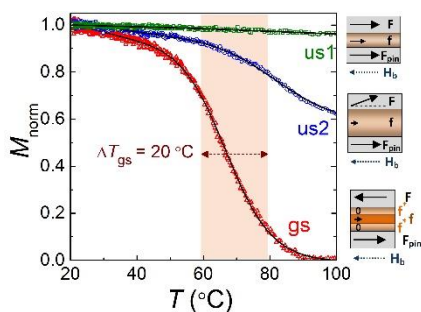


Рис. 12. Нормовані температурні залежності намагніченості Кюрі перемикачів з однорідним  $f$  (us1, us2) і градієнтним  $f^*/f^*$  прошарками.

магнітною гранулою і немагнітною матрицею призводить до появи обмінної взаємодії між магнітними моментами найближчих магнітних гранул. У рамках цієї моделі показано, що при малих концентраціях феромагнітного матеріалу колективна поведінка ансамблю наногранул визначається непрямою обмінною взаємодією з поляризованою підсистемою вільних електронів провідності. Висновки теоретичних досліджень, отримані в рамках моделі непрямого обміну, мають експериментальне підтвердження. Деталі механізму цієї взаємодії також обговорені в *підрозділі 2.5* для наногранульованих структур. Ця феноменологічна модель міжгранульної взаємодії в подальшому була успішно розширена для пояснення обмінної міжшарової взаємодії в Кюрі-перемикачах.

Запропоновано практичне застосування досліджених багатошарових наноструктур для спінтронних пристроїв на основі спін-термо-електронної комутації.

**Третій розділ** “Магнітні динамічні властивості багатошарових наноструктур з температурно залежною прямою міжшаровою обмінною взаємодією” присвячений дослідженням температурних та кутових залежностей параметрів феромагнітного резонансу (ФМР) (спектрів, резонансних полів  $H_r$ , напівширин ліній  $\Delta H_r$ ) в Кюрі-перемикачах. (див. розд. 2). На основі аналізу параметрів ФМР визначені магнітні властивості окремих компонентів КП, такі як ефективна намагніченість прошарку  $f$ , параметри магнітної релаксації, магнітна анізотропія в структурі, а також поля температурного перемикання магнітних станів даних структур.

В *підрозділах 3.1* і *3.2* досліджено вплив міжшарової  $F_1$ - $F_{2\text{ pin}}$  обмінної взаємодії через прошарок  $f$  на резонансні поля  $H_{r1}$  і  $H_{r2}$ , відповідно, вільного  $F_1$  і закріпленого  $F_{2\text{ pin}}$  шарів в Кюрі-перемикачах  $F_1/f(x, d)/F_{2\text{ pin}}$  в залежності від товщини  $d$  слабомагнітного прошарку  $f = \text{Ni}_x\text{Cu}_{100-x}$ , його складу  $x$  та температури. Визначено ключові магнітні параметри прошарку  $f$ , які впливають на магнітний резонанс в КП: довжину магнітного обміну  $\Lambda$ ; ефективну намагніченість насичення  $m_0$  при  $T=0$ ; ефективну температуру Кюрі  $T_C^{\text{eff}}$ . Значення цих ключових параметрів були вираховані з експериментальних даних

ілюстраціях праворуч зображені взаємні орієнтації магнітних моментів в окремих шарах КП. Напівширина температурного переходу  $\Delta T_{gs}$  найменша для КП із градієнтним прошарком.

В *підрозділі 2.4* запропонована феноменологічна модель обмінної взаємодії між наногранулами металевого феромагнетика через прошарки немагнітної матриці в магнітних наногранульованих матеріалах. Поляризація електронної підсистеми на інтерфейсі маж



ФМР для КП з  $x_f=54\div 70$  ат. % та  $d_f=3\div 6$  нм. Розроблений підхід для дослідження спінової динаміки системи дозволив отримати детальні кількісні характеристики магнітного стану КП, які, в іншому випадку, важко або неможливо отримати шляхом прямих вимірів через сильний ефект підмагнічування на інтерфейсах  $F_1/f$  і  $f/F_2$  pin.

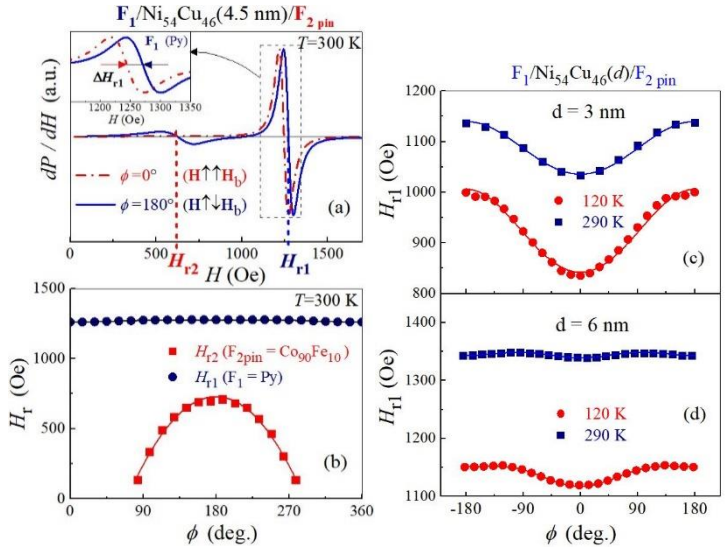


Рис. 13 (а) Спектри ФМР КП з  $f = \text{Ni}_{54}\text{Cu}_{46}$  (4,5 нм) для паралельної (суцільна лінія) і антипаралельної (червона пунктирна лінія) орієнтацій прикладеного магнітного поля  $\mathbf{H}$  відносно обмінного поля зміщення  $\mathbf{H}_b$ . Верхня вставка показує збільшений вигляд сигналу від  $F_1$ . (б) Залежності резонансних полів  $H_{r1}$  і  $H_{r2}$ , відповідно, шарів  $F_1$  і  $F_2$  pin, від кута  $\phi$  між  $\mathbf{H}$  і  $\mathbf{H}_b$ . (с), (d) Кутові залежності  $H_{r1}$  КП з  $x = 54$  ат.% і  $d_f = 3$  і 6 нм при різних температурах.

ФМР спектри, виміряні в геометрії “*in-plane*”, демонструють два добре розділені резонансні сигнали з полями  $H_{r1}$  і  $H_{r2}$ , що відповідають шарам  $F_1$  і  $F_2$  pin. (рис. 13, а).  $H_{r1}$  і  $H_{r2}$  залежать від кута  $\phi$  між  $\mathbf{H}$  і  $\mathbf{H}_b$  (рис. 13, б). Для виявлення впливу міжшарової обмінної взаємодії на спінову динаміку шару  $F_1$  кутові залежності  $H_{r1}$  були вивчені при різних температурах для серії зразків з різною товщиною  $d$  прошарку  $f$ .  $H_{r1}$  залежить від кута  $\phi$  (рис. 13, с, d). Кутова асиметрія зростає при зменшенні температури і стає більш вираженою при зменшенні товщини  $d$  прошарку  $f$  за рахунок підсилення міжшарової взаємодії, як при пониженні температури, так і при зменшенні  $d$  (рис. 13, с, d). Значення  $H_{r1}$  залежить від орієнтації зовнішнього магнітного поля відносно обмінного поля зміщення  $\mathbf{H}_b$  - паралельної ( $\uparrow\uparrow$ ) чи антипаралельної ( $\uparrow\downarrow$ ). Різниця резонансних полів для цих двох орієнтацій для вільного  $F_1$  шару  $\Delta H_{r1} = H_{r1}^{\uparrow\downarrow} - H_{r1}^{\uparrow\uparrow}$  пропорційна силі обмінної взаємодії між шарами  $F_1$  і  $F_2$  pin.  $\Delta H_{r1}$  різко змінюється в околі точки Кюрі прошарку  $f$  в результаті різкого збільшення його намагніченості  $m$  при переході із парамагнітного в феромагнітний стан.  $\Delta H_{r1}$  прямує до нуля зі зростанням  $T$  вище точки Кюрі для прошарку  $f$ . Ключовою величиною, що визначає поведінку  $\Delta H_{r1}$  і  $H_{r2}^{\uparrow\downarrow}$ , є намагніченість прошарку  $m$ ,

усереднена по товщині шару. Прошарок знаходиться в феромагнітному стані нижче точки Кюрі і умовно парамагнітний вище неї. Раніше було показано, однак, що ефект близькості на межі з сильним феромагнетиком викликає помітне підмагнічування парамагнітного або слабо феромагнітного металу і може призводити до збільшення його точки Кюрі. Довжина близькості на порядок

величини більша ніж міжатомна відстань і у випадку, коли товщина  $d$  прошарку  $f$  порядку декількох нанометрів, індукована намагніченість проникає крізь товщину прошарку. Іншою важливою величиною, що впливає на спінову динаміку в системі, є обмінне поле зміщення  $\mathbf{H}_b$ .

Для підгонки теоретичних  $\Delta H_{F1}(T)$  і  $H_{F2}^{\uparrow\downarrow}(T)$  та експериментальними даних були використані змінні параметри  $\text{Ni}_x\text{Cu}_{100-x}$  прошарку  $f$ : ефективна температура Кюрі  $T_C^{\text{eff}}$ ; намагніченість насичення  $m_0$  при  $T=0$ , а також характерна довжина магнітного обміну  $\Lambda$ . Отримані значення  $\Lambda$  приблизно в два рази більші, ніж товщина прошарку  $d$ , в межах наближення  $d \ll \Lambda$ , використаного при аналізі. Експериментальні і теоретичні залежності  $\Delta H_{F1}(T)$ ,  $H_{F2}^{\uparrow\downarrow}(T)$  і  $m/m_0$  для КП з прошарками  $\text{Ni}_x\text{Cu}_{100-x}$  різної товщини і концентрації приведені на рис. 14. На рис. 14, с представлено температурну залежність приведеної намагніченості  $m/m_0$  прошарку, отриманої з підбору значень резонансних полів для різних товщин  $d$  прошарку  $f$ . Ефект близькості на межах поділу  $F_1/f$  і  $f/F_2$  не має, по суті, ніякого впливу на низькотемпературну намагніченість прошарку, але є домінуючим чинником при визначенні його ефективної точки Кюрі  $T_C^{\text{eff}}$ . Зміни в  $T_C^{\text{eff}}$  сильно залежать від товщини прошарку: чим менше  $d$ , тим сильніший ефект близькості на інтерфейсах  $F_1/f$  і  $f/F_2$ , і тим

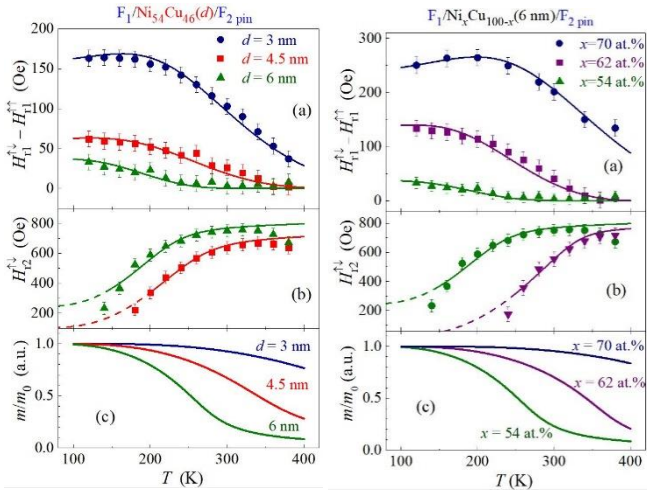


Рис. 14. Температурні залежності  $H_{F1}^{\uparrow\downarrow}-H_{F1}^{\uparrow\uparrow}$  (a) і  $H_{F2}^{\uparrow\downarrow}$  (b) для  $F_1/\text{Ni}_{54}\text{Cu}_{46}(d)/F_2/\text{AF}$  зразків для трьох товщин прошарку (ліва панель) (символи) та для  $F_1/\text{Ni}_x\text{Cu}_{100-x}(6 \text{ nm})/F_2/\text{pin}$  зразків для трьох концентрацій Ni (права панель) (символи). Жирні суцільні лінії показують теоретичні залежності  $H_{F1}^{\uparrow\downarrow}-H_{F1}^{\uparrow\uparrow}$  і  $H_{F2}^{\uparrow\downarrow}$  від  $T$ , отримані на основі рівнянь (4) і (6) відповідно. (c) Температурні залежності нормованої намагніченості прошарку  $m/m_0$ , отримані з використанням вищевказаного набору резонансних полів.

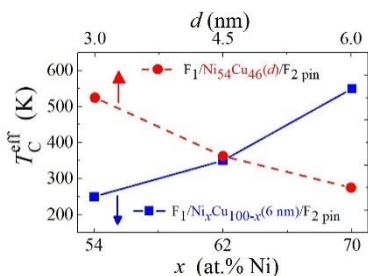


Рис. 15. Залежність ефективної температури Кюрі  $T_C^{\text{eff}}$   $\text{Ni}_x\text{Cu}_{100-x}$  прошарку від його товщини  $d$  (при фіксованому складі  $x=54$  ат.%) і концентрації  $\text{Ni}$   $x$  (при фіксованій товщині  $d=6$  нм).

впливає на резонансні поля обох шарів  $F_1$  і  $F_2$ . Передбачуваний магнетизм в ключовому елементі структури – прошарку, діючий в якості міжшарового обміну – демонструє високу чутливість і, таким чином, високу зміну його властивостей від ступеня магнітного розбавлення, геометрії і температури. Ці результати можуть бути корисні для розробки високошвидкісних нанопристроїв на основі спін-термоелектронного контролю.

В *підрозділі 3.3* експериментально досліджено і теоретично проаналізовано вплив обміну між шарами сильних феромагнетиків  $F_1$  і  $F_{2 \text{ pin}}$  через прошарок розбавленого феромагнетика  $f$  на магнітні резонансні властивості КП з прошарком  $\text{Ni}_{54}\text{Cu}_{46}$  товщиною  $d = 3; 4,5; 6$  і  $9$  нм. Вивчені механізми, які впливають на релаксацію магнітних моментів шарів  $F_1$  і  $F_{2 \text{ pin}}$  і, зокрема, виявлена роль міжшарової обмінної взаємодії в спіновій релаксації в таких структурах шляхом експериментальних досліджень і теоретичного аналізу ширин ліній ФМР і їх анізотропії в структурах  $F_1/f(d)/F_{2 \text{ pin}}$ . Роль обмінної міжшарової взаємодії в процесах спінової релаксації в системі була досліджена шляхом зміни товщини  $d$  слабомагнітного прошарку  $f$ . Досліджено ефективність обміну мікрохвильової енергії між шарами  $F_1$  і  $F_{2 \text{ pin}}$  в залежності від величини обміну між цими шарами та оцінена можливість керування намагніченістю закріпленого шару  $F_{2 \text{ pin}}$  в процесі резонансної прецесії намагніченості в вільному шарі  $F_1$ . Досліджено слабший зворотний ефект, коли намагніченість шару  $F_1$  стає обмінно керованою в результаті прецесії намагніченості в шарі  $F_{2 \text{ pin}}$ , що призводить до антидемпінгових і вузьких ліній ФМР шару  $F_1$ . Сильніший міжшаровий  $F_1$ - $F_{2 \text{ pin}}$  обмін призводить до сильнішого анізотропного затухання намагніченості, досягаючи свого максимуму при напрямку, який є антипаралельним до напрямку поля обмінного зміщення в системі  $F_1/f(d)/F_{2 \text{ pin}}$ . Виокремлено і обговорено різні внески в магнітну релаксацію в системі шляхом теоретичної підгонки вимірних даних ФМР. Визначені кількісно основні фізичні параметри, такі як константи міжшарової взаємодії, а також анізотропія

вища  $T_C^{\text{eff}}$  (рис. 15). Розраховані залежності ефективної точки Кюрі  $T_C^{\text{eff}}$  прошарку від його товщини  $d$  і вмісту  $\text{Ni}$   $x$  приведені на рис. 15. Невеликі зміни  $d$  і  $x$  призводять до значних змін  $T_C^{\text{eff}}$ . Необхідно відзначити також, що значення температури Кюрі прошарку сплаву  $\text{Ni}_x\text{Cu}_{100-x}$ , розміщеного між шарами сильних феромагнітних сплавів, набагато більше, ніж відповідне значення для такого розбавленого сплаву в об'ємному вигляді –  $T_C^{\text{eff}} \approx 120$  К і  $300$  К для  $x=54$  і  $70$  ат.%, відповідно.

Таким чином, обмінна взаємодія між шарами  $F_1$  і  $F_2$  через прошарок  $f$  в КП сильно

напівширини ліній ФМР в площині багат шарової структури. Отримано кількісні дані для параметрів дисперсії багат шарової структури.

На кутових залежностях (рис. 16, а) резонансного поля  $H_{r1}$  “вільного” шару  $F_1$  в площині для всіх зразків спостерігається слабка однобісна анізотропію в площині ( $H_{ua} \approx 5$  Е), що є наслідком прикладання зовнішнього магнітного поля під час виготовлення плівок. При зменшенні  $d$  з’являється і стає домінуючим додатковий однонаправлений внесок, що є результатом зростання міжшарової обмінної взаємодії при зменшенні товщини прошарку  $f$ . Із рис. 16 (а) видно, що сильніша  $F_1$ - $F_{2, \text{pin}}$  міжшарова взаємодія сприяє виникненню однонаправленої магнітної анізотропії в  $F_1$ , а також знижує в цілому резонансне поле  $H_{r1}$ . Оскільки константа міжшарової взаємодії обернено пропорційна товщині прошарку,  $H_{r1}$  є лінійною функцією  $1/d$  (рис. 16, f). Цей факт добре узгоджується між експериментом і моделюванням  $H_{r1}(\varphi)$ .

Напівширина лінії ФМР залежить від спінової релаксації в структурі. Для товстих прошарків (9 і 6 нм) з практично відсутньою міжшаровою взаємодією спостережувана 90 градусна періодичність на кутових залежностях напівширини ліній ФМР  $\Delta_1(\varphi)$  пов’язана з розсіянням значень поля однобісної анізотропії ( $\delta H_{ua} \leq 0,2H_{ua}$ ) в магнітом’якому феромагнітному шарі  $F_1$  (рис. 16, b, c). При зменшенні  $d$  стає домінуючим внесок від однонаправленого міжшарового зв’язку. Шляхом підгонки експериментальних результатів з використанням моделі, розгорнутої в роботі, були отримані значення константи взаємодії  $k$ . Зменшення товщини прошарку від 9 до 4,5 нм посилює  $k$  від 1 до 180 Е, що в свою чергу збільшує анізотропію в площині в  $\Delta_1$ : різниця між значеннями  $\Delta_1$  вздовж і проти  $\mathbf{H}_b$  зростає практично від нуля до 6 Е ( $\sim 6\% \Delta_1$ ).

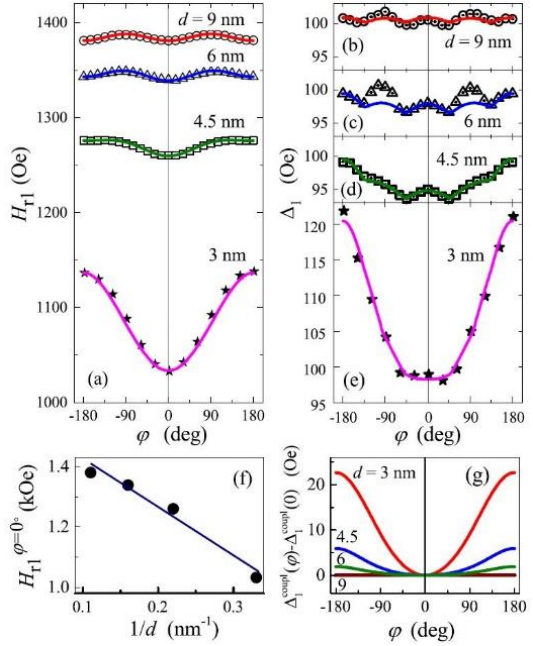


Рис. 16. Кутові залежності  $H_{r1}$  в площині шару  $F_1$  (а) та ширини лінії (b) – (e) для КП  $F_1/\text{Ni}_{54}\text{Cu}_{46}(d)/F_{2, \text{pin}}$ . Суцільні лінії – модельні розрахунки. (f)  $H_{r1}$ , виміряне при  $\varphi = 0^\circ$ . (g) Анізотропний внесок у ширину лінії ФМР за рахунок міжшарової взаємодії. Верхній індекс "coupl" означає, що враховується тільки складова з модельних кривих (b) – (e).

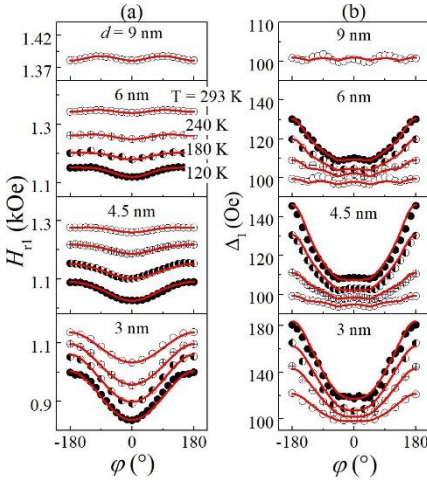


Рис. 17. Кутові залежності резонансного поля  $H_{r1}(\varphi)$  (а) і ширини лінії  $\Delta_1(\varphi)$  (б)  $F_1/f(d)/F_{2\text{ pin}}$  ( $d = 3; 4.5; 6$  і  $9$  нм ) при температурах  $T = 293, 240, 180$  і  $120$  К. Суцільні лінії – розрахунки з використанням моделі, розробленої в роботі.

залежностях  $H_{r1}(\varphi)$  як поява і підсилення однонапрямленої магнітної анізотропії. Оскільки зміни однонапрямленої анізотропії призводять до зміни різниці між резонансними полями, через вимірювання вздовж і проти  $\mathbf{H}_b$ , в подальшому зручно використовувати параметр  $\Delta H_{r1}^* = H_{r1}(180^\circ) - H_{r1}(0^\circ)$  як кількісну міру однонапрямленої анізотропії. Другим важливим параметром, на якому позначається ефект міжшарової взаємодії, є ширина резонансної лінії  $\Delta_1$  будемо використовувати параметр  $\Delta_1^* = \Delta_1(180^\circ) - \Delta_1(0^\circ)$ . З даних рис. 17 випливає, що пониження температури і зменшення товщини прошарку призводять до збільшення  $\Delta H_{r1}^*$  і  $\Delta_1^*$ .

Отримані результати є корисними для опису різних динамічних процесів, що впливають на затухання намагніченості в сучасних високошвидкісних багатошарових магнітних наноструктурах, які є перспективними для практичних застосувань в

Збільшення міжшарового зв'язку впливає на значення параметрів затухання  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$ , відповідно, для шарів  $F_1$  і  $F_2$ .

Резонансне поле шару  $F_1$  залежить як від температури, так і від кута між  $\mathbf{H}$  і  $\mathbf{H}_b$  (рис.17, а). Кутові залежності ширини лінії  $\Delta_1(\varphi)$  також істотно трансформуються при зміні товщини прошарку  $d$  і температури (рис. 17, б). Виявлені зміни в залежностях  $H_{r1}(\varphi)$  і  $\Delta_1(\varphi)$  можна пов'язати с посиленням обмінної взаємодії між вільним шаром  $F_1$  і закріпленим шаром  $F_{2\text{ pin}}$  через слабомагнітний прошарок  $f$ . Аналіз кутових залежностей резонансного поля  $H_{r1}$  дозволив отримати інформацію про характер зміни магнітної анізотропії в шарі  $F_1$  при зміні міжшарової взаємодії. Посилення міжшарової взаємодії в системі  $F_1/f/F_{2\text{ pin}}$  проявляється на

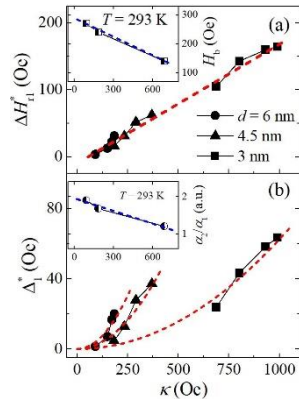


Рис. 18. Рис. 3.8. Залежність параметрів  $\Delta H_{r1}^*$  (а) і  $\Delta_1^*$  (б) від константи між шарового зв'язку  $k$  для  $F_1/f(d)/F_{2\text{ pin}}$ .

галузі спінтроніки, що робить виконану роботу більш важливою для широкої сфери застосувань.

В *підрозділі 3.4* приведені результати дослідження феромагнітного резонансу (ФМР) у магнітних багатошарових наноструктурах з послабленим ефектом підмагнічування на інтерфейсі між сильним і слабким феромагнетиками шляхом використання градієнтного прошарку  $F_1/f^*/f/f^*/F_2$  pin. Метод дозволяє виявити слабкий сигнал від прошарку  $f$  додатково до більш вираженого і легко вимірюваного сигналу від зовнішніх сильномагнітних шарів  $F_1$  і  $F_2$ , і тим самим вивчити магнітні властивості слабомагнітного прошарку і міжшарову  $F_1$ - $F_2$  обмінну взаємодію, яку він передає.

В *четвертому розділі* “*Магнітні багатошарові наноструктури з термічним перемикання характеру непрямого міжшарового обміну*” приведені результати експериментальних досліджень термічно регульованої непрямої міжшарової обмінної взаємодії в магнітних багатошарових наноструктурах  $Fe/Fe-Cr/Fe$ , в яких, в залежності від температури, домінуючою міжшаровою взаємодією може бути або пряма обмінна взаємодія феромагнітного типу, відповідальна за феромагнітне (паралельне) впорядкування магнітних моментів шарів феромагнетиків, або непряма обмінна взаємодія типу РККІ, відповідальна за антиферомагнітне (антипаралельне) впорядкування магнітних моментів шарів  $Fe$ .

В *підрозділі 4.1* приведені результати дослідження магнітних властивостей багатошарових наноструктур  $Fe/Cr/Fe_xCr_{100-x}/Cr/Fe$  та наноструктур з покращеним інтерфейсом  $Fe(2)/Cr(1.5)/Fe(0.25)/Fe_xCr_{100-x}(3)/Fe(0.25)/Cr(1.5)/Fe(0.25)/Fe_xCr_{100-x}(3)/Fe(0.25)/Cr(1.5)/Fe(2)$  в яких непряма обмінна взаємодія, також

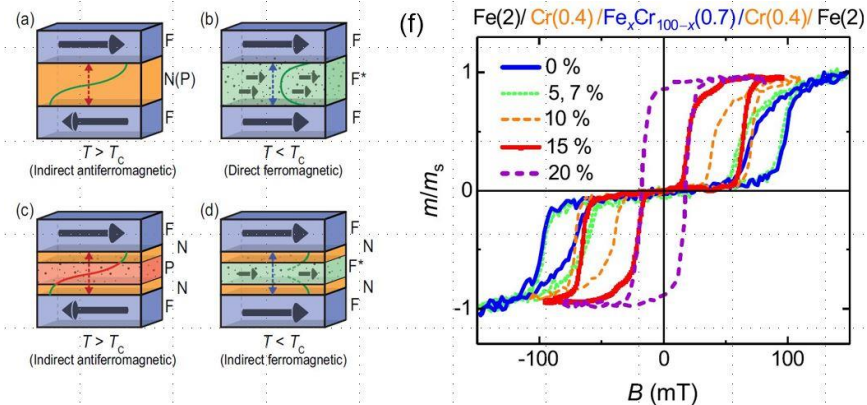


Рис. 19. Ілюстрація магнітних станів у магнітній тришаровій структурі: феромагнетик (F)/прошарок (S)/феромагнетик (F) (F/S/F): (a) однорідний немагнітний (N) або парамагнітний (P) прошарок  $S = N(P)$ ; (b) однорідний феромагнітний прошарок  $S = F^*$ ; (c) композитний прошарок  $S_1 = N/P/N$ ; (d) композитний прошарок  $S_2 = N/F^*/N$ . Кюрі перехід у однорідному феромагнітному прошарку  $F^*$  в композитному прошарку  $N/F^*/N$  змінює знак РККІ в результаті зміни ефективної товщини композитного прошарку.

відома як РККІ, може бути ввімкнута чи вимкнена за допомогою невеликої зміни температури.

Продемонстровано вмикання чи вимкнення непрямого обміну в магнітних багатошарових наноструктурах на основі таких структур, в яких, в залежності від їх складу, спостерігається тепла комутація непрямої обмінної взаємодії у вузькому діапазоні температур 10 - 20 К, в околі будь якої необхідної температури, включаючи кімнатну або навіть вище кімнатної температури. Ідея такого перемикаччя полягає в термічній зміні ефективної товщини прошарку між сильними феромагнітними шарами при нагріві структури (рис. 19, a-d). Продемонстровано магнітний фазовий перехід у багатошаровій структурі Fe/Cr з градієнтним прошарком по концентрації, який забезпечує феромагнітну взаємодію РККІ

при низькій температурі та сильну антиферомагнітну взаємодію при високій температурі в магнітному полі близько 100 мТ для обох випадків (рис. 19, f). Шляхом оптимізації вибору матеріалів та їх розташування в структурі, було отримано прямий і повністю зворотній термічний перемикач РККІ взаємодії з сильної феромагнітної до сильної антиферомагнітної (рис. 20).

Ці результати є високотехнологічними з точки зору наявних матеріалів та діючих фізичних принципів, додають принципово нові функціональні властивості магнітним багатошаровим наноструктурам з непрямым обміном і суттєво розширюють клас магнітних багатошарових наноструктур з температурно регульованим міжшаровим обміном, привабливих для практичного застосування в галузі спінтроники.

В *підрозділі 4.3* обговорено механізми теплового контролю *ex-situ* непрямого міжшарового обмінного зв'язку в синтетичних антиферомагнетиках з прошарками різного типу. Показано, що температурні зміни гістерезису

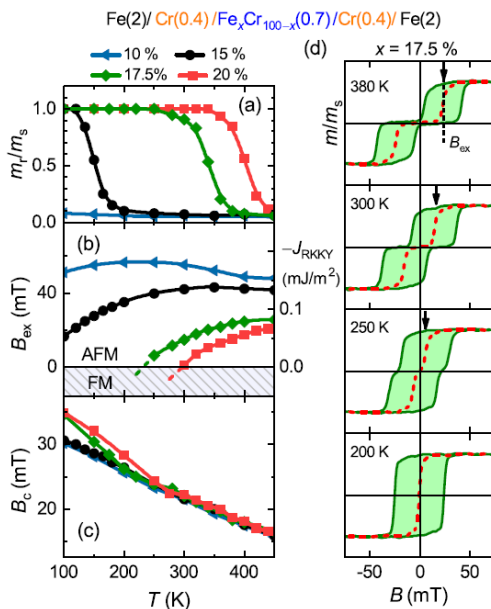


Рис. 20. Температурні залежності (a) нормованого залишкового магнітного моменту ( $m_r$ ), (b) обмінного поля ( $B_{\text{ex}}$ ) і відповідного інтегралу РККІ зв'язку  $J_{\text{РККІ}}$  і (c) коерцитивності ( $B_c$ ) для тришарової структури F/S/F з  $S = \text{Fe(2)/Cr(0.4)/Fe}_x\text{Cr}_{100-x}(0.7)/\text{Cr(0.4)/Fe(2)}$ . (d) петлі намагніченості для концентрації  $x = 17.5\%$  при температурах вище і нижче температури Кюрі.

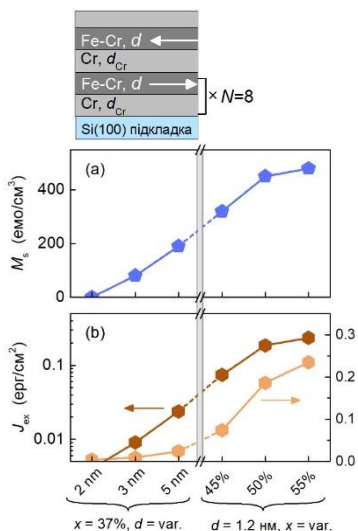


Рис. 21. (верхня панель) Схематичне зображення досліджуваних багат шарових наноструктур:  $[\text{Fe}_x\text{Cr}_{100-x}(d)/\text{Cr}(d_{\text{Cr}})]_x \times 8$ ;  $d = 2, 3, 5$  нм,  $d_{\text{Cr}} = 1,2$  нм;  $x = 37, 45, 50, 55$  ат. % Fe. (а) Намагніченість насичення,  $M_s$ , (а) та константа міжшарової взаємодії,  $J_{ex}$ , (б) в залежності від товщини  $d$  та концентрації  $x$  у шарах  $\text{Fe}_x\text{Cr}_{100-x}(d)$ .

Cr)/Cr інтерфейсах.

**П'ятий розділ** "Вплив ефекту спінової накачки на спінову динаміку в магнітних багат шарових наноструктурах" присвячено дослідженню впливу ефекту спінової накачки на спінову динаміку в магнітних багат шарових наноструктурах на основі антиферомагнетиків і синтетичних феримагнетиків під час феромагнітного резонансу в таких структурах: (а) явища спінової накачки у багат шарових наноструктурах «антиферомагнетик / немагнітний метал / феромагнетик»; (б) впливу параметрів магнітного та немагнітного шарів на процеси дисипації у багат шарових наноструктурах з антиферомагнітним компонентом; (в) спінової релаксації в багат шарових наноструктурах із синтетичним феримагнетиком; (г) розсіювання спінового струму в двошаровій наноструктурі «феромагнетик / антиферомагнетик».

В *підрозділі 5.1* експериментально досліджено дисипативний відгук в магнітних багат шарових наноструктурах  $\text{MnIr}/\text{Cu}/\text{Pu}$  шляхом вивчення ширини лінії феромагнітного резонансу (ФМР) феромагнітного шару  $\text{Pu}$ , спричиненого збудженням динамічного міжшарового  $\text{MnIr}-\text{Pu}$  обміну через немагнітний прошарок  $\text{Cu}$  через ефект спінової накачки. Були досліджені

намагніченості пов'язані з різними типами конкуруючих міжшарових обмінних взаємодій.

*Підрозділ 4.4* присвячений детальному дослідженню міжшарової обмінної взаємодії в антиферомагнітно зв'язаних багат шарових структурах  $\text{Fe}-\text{Cr}/\text{Cr}$  в залежності від товщини шарів  $\text{Fe}-\text{Cr}$  та їх немагнітного розбавлення атомами  $\text{Cr}$  (рис. 21, а). Отримані значення намагніченості насичення та константи міжшарової взаємодії в залежності від товщини  $\text{Fe}-\text{Cr}$  шарів та їх концентрації дозволили охарактеризувати вплив розмірних ефектів та немагнітного розбавлення на магнітостатичну поведінку досліджуваної системи. Константа взаємодії в таких структурах може налаштовуватись в широких межах ( $0,004 \div 0,235$  erg/cm<sup>2</sup>), в залежності від концентрації магнітної компоненти в шарах розбавленого сплаву  $\text{Fe}-\text{Cr}$  та їх товщини (рис. 21, а, б). Показано, що зростання концентрації атомів заліза на інтерфейсі  $(\text{Fe}-\text{Cr})/\text{Cr}$  ефективно підсилює міжшарову обмінну взаємодію через зростання магнітної поляризації на  $(\text{Fe}-$



резонансні властивості в залежності від товщини феромагнітного шару Ru (рис. 22). Основна увага

зосереджена на резонансних властивостях ФМ шару, зокрема залежностях затухання на інтерфейсі

ФМ/НМ. Отримані результати, в межах похибки, узгоджуються з теорією, згідно з якою, при сталих параметрах поверхневої провідності, добуток  $\alpha_{sp}M_F$  повинен бути сталим.

В підрозділі 5.3 приведені результати дослідження власної та стимульованої навколишнім оточенням магнітної релаксації магнітом'якого феромагнітного шару пермалою Ru = Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub> в структурі Ru(5 нм) / Cu(5 нм) / Fe(2 нм) Cr( $d_{Cr}$ ) / Fe(6 нм) (де  $d_{Cr}$  = 1.3, 1.5, 1.7, 2, і 5 нм), зв'язаного через немагнітний прошарок Cu із синтетичним феримагнетиком (СФМ) Fe/Cr/Fe динамічним обміном, спричиненим спіноювою накачкою через прошарок Cu в процесі феромагнітного резонансу в Ru шарі. Дослідження проведені з використанням вимірювання *in-plane* та *out-of-plane* феромагнітного резонансу та магнітометрії в поєднанні з

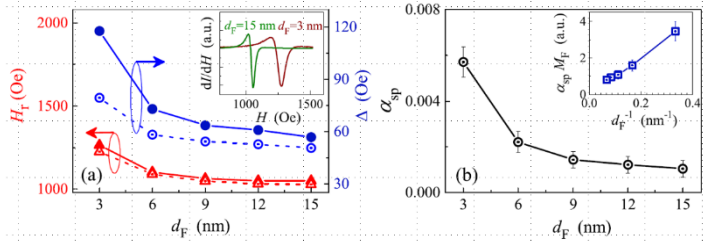


Рис. 22. (а) Резонансні поля  $H_r$  (трикутники) і напівширини ліній ФМР (кола) в залежності від товщини  $d_F$  шару Ru в багатошарових наноструктурах АФМ/Cu/ФМ( $d_F$ ) (bold символи, суцільні лінії) і референсних зразків (відкриті символи, штриховані лінії). Вставки показують типові ФМР спектри АФМ/Cu/ФМ( $d_F$ ) зразків з  $d_F = 3$  і 15 нм. (б) Залежності параметру затухання від спінової накачки  $\alpha_{sp}$  від товщини шару Ru для АФМ/Cu/ФМ( $d_F$ ) структур. Вставка показує добуток  $\alpha_{sp}M_F$  як функцію  $d_F^{-1}$ .

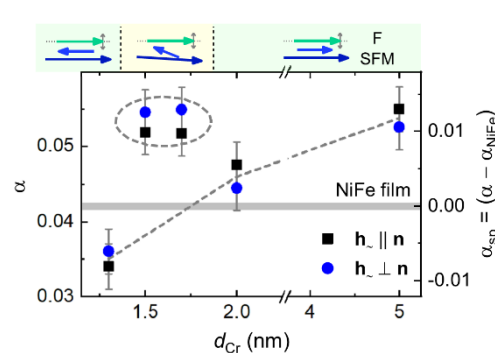


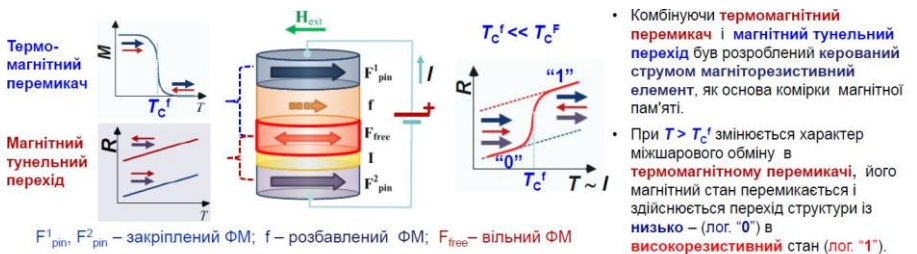
Рис. 23. Залежність параметра затухання  $\alpha$  від товщини хрому у СФМ для вільного шару Ru. Горизонтальна лінія позначає затухання у референтній плівці пермалою. Верхня панель відображає конфігурацію резонуючих шарів F.

теоретичним аналізом. Продемонстровано сильну налаштованість внеску спінової накачки у магнітне затухання в Ru шарі, що взаємодіє із СФМ через прошарок Cu, від магнітного стану останнього. САФ являє собою тришарову структуру, складену з двох шарів Fe, взаємодіючих за допомогою непрямого обміну через прошарок Cr. Зі збільшенням товщини Cr стан СФМ послідовно переходить по відношенню до магнітного моменту Ru шару від антипаралельної конфігурації

через неколінарну конфігурацію до паралельної. При цьому спостерігається немонотонна залежність спінової релаксації у вільному шарі, яка теоретично пояснена з урахуванням модуляції поздовжнього спінового транспорту, а також релаксації поперечного кутового моменту в СФМ. Результати є корисними для проектування високошвидкісних спітронічних пристроїв, де регулювання релаксації спіна є вигідним.

**Шостий розділ** “Магнітні наноструктури з термоелектронним керуванням магнітними станами для застосування в спітроніці” присвячений практичному застосуванню в галузі спітроніки магнітних багатшарових наноструктур з прямою і непрямою обмінними міжшаровими взаємодіями з температурним керуванням їх магнітними станами.

В *підрозділі 6.1* розглянуто індукване електричним струмом термомагнітне перемикання магнітного і резистивного станів в структурі з температурно керованою міжшаровою обмінною взаємодією “нижній електрод



#### Експеримент:

підкладка/ел.1/MnIr(15 нм)/CoFe(2)/CoFeB(2)/AlO(0.7)/CoFeB(5)/Ni<sub>72</sub>Cu<sub>28</sub>(20)/CoFe(2)/MnIr(12)/ел.2

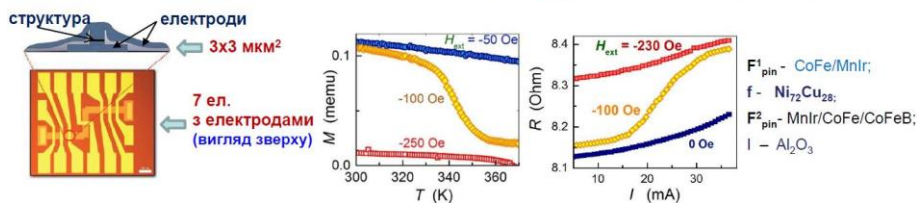


Рис. 24. (Верхня панель) Схематичне зображення термомагнітного перемикання у Кюрі-перемикачі (КП)  $F^1_{pin}/f/F^{free}$ , об'єднаному із магнітним тунельним переходом (МТП)  $F^{free}/l/F^2_{pin}$  у вертикальну структуру: (а) сумарний магнітний момент  $M$  в залежності від температури  $T$  для КП; (б) залежності опору  $R$  від температури  $T$  для паралельного та антипаралельного станів МТП за відсутності термомагнітного перемикання; (в) схема багатшарової структури із спільним вільним шаром  $F^{free}$  між КП та МТП; (г)  $R(T)$  для структури «КП-МТП» з термомагнітним перемиканням; (д) вигляд збоку (зображення) та зверху (зображення з оптичного мікроскопу) багатшарової структури «КП-МТП», виготовленої з використанням трьох-крокової фотолітографії. Стрілки на рис. (а) – (г) вказують напрямки орієнтації магнітних моментів окремих шарів.

(Нижня панель) Залежності  $M(T)$  для трьох фіксованих значень магнітного поля. Опір як функція струму, виміряна при різних значеннях прикладеного магнітного поля.

/[ $F_{2\text{ pin}}/I/F_{\text{free}}/f/F_{1\text{ pin}}$ ] / верхній електрод”, що поєднує Кюрі-перемикач (КП)  $F_{1\text{ pin}}/f/F_{\text{free}}$  (рис. 24) та магнітний тунельний перехід (МТП)  $F_{\text{free}}/I/F_{2\text{ pin}}$ . Тут шар  $F_{\text{free}}$  виступає в якості як вільного, так і шару зчитування, а  $I$  є непровідний тунельний бар’єр. В цій структурі спостерігається термомагнітне перемикання у слабкому магнітному полі при фазовому переході *феромагнетик-парамагнетик* прошарку розбавленого феромагнетика  $f$  поблизу температури Кюрі  $T_C^f$  за рахунок викликаного електричним струмом нагрівання структури, що схематично зображено на рис.24, г. При  $T > T_C^f$  змінюється характер міжшарового обміну в КП, його магнітний стан перемикається і здійснюється перехід структури із низько – (лог. “0”) в високорезистивний стан – (лог. “1”) (рис. 24, в). В роботі змодельовано процеси проходження струму та розподілу тепла в окремих шарах дослідного зразку пристрою, виготовленого у вигляді літографічної структури та показано, що для зменшення температурного інтервалу термомагнітного перемикання необхідно виготовляти структури з меншим поперечним діаметром в якому забезпечується більш однорідий розподіл електричного струму.

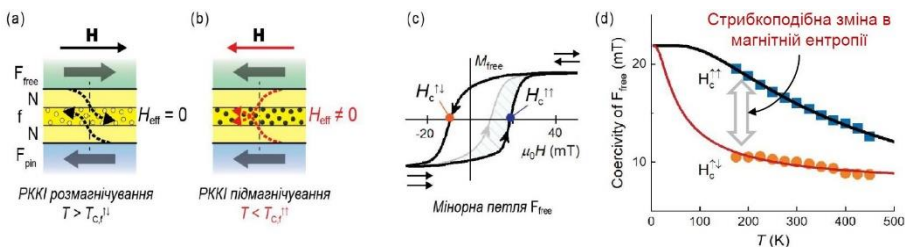
В роботі досліджена багат шарова наноструктура, до складу якої входили наступні компоненти:  $F_{2\text{ pin}} = \text{IrMn}(15) / \text{CoFe}(2) / \text{CoFeB}(2)$ ,  $I = \text{AlO}_x(0,7)$ ,  $F_{\text{free}} = \text{CoFeB}(5)$ ,  $f = \text{Ni-Cu}(20)$  та  $F_{1\text{ pin}} = \text{CoFe}(2) / \text{IrMn}(12)$ . В дужках приведені товщини шарів в “нм”. У якості нижнього та верхнього електродів були використані товсті шари  $\text{Cu}$  (товщиною до 100 нм); між електродами та внутрішньою багат шаровою структурою були осаджені буферні шари  $\text{Ta}(5)$ , які виконували також функцію теплових затворів. Шар антиферомагнетика  $\text{Ir}_{20}\text{Mn}_{80}$  ( $\text{IrMn}$ ) був використаний для обмінного закріплення  $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$  ( $\text{CoFe}$ ) в обмінно закріплених шарах феромагнетиків  $F_{2\text{ pin}}$  та  $F_{1\text{ pin}}$ . Слабо-коерцитивний шар  $\text{Co}_{60}\text{Fe}_{20}\text{B}_{20}$  [ $\text{CoFeB}(5)$ ] був використаний в якості спільного вільного шару  $F_{\text{free}}$ . Шар розбавленого феромагнітного сплаву  $\text{Ni}_{72}\text{Cu}_{28}$  [ $\text{Ni-Cu}(20)$ ] був отриманий при одночасному осадженні із двох окремих мішеней  $\text{Ni}$  та  $\text{Cu}$ . Для того, щоб забезпечити обмінне підмагнічування на інтерфейсах  $\text{IrMn}/\text{FM}$ , відповідне осадження виконувалось у магнітному полі  $\sim 600$  Е. Для виготовлення переходів  $F_{2\text{ pin}}/I/F_{\text{free}}/f/F_{1\text{ pin}}$  з поперечним діаметром 3 мкм був використаний процес трьох-крокової оптичної літографії (рис. 24, г). Магнітоопір вимірювався в геометрії «струм перпендикулярний до площини плівки» з магнітним полем, прикладеним в площині структури, протилежно напрямку закріплення.

Структури, що поєднують МТП і КП, характеризуються високою здатністю до налаштування в необхідному температурному діапазоні.

В *підрозділі 6.1* вперше запропоновано інноваційний підхід до локальної температурної стабілізації мікророзмірних елементів електроніки із застосуванням магнітних багат шарових наноструктур з гігантським магнітокалоричним ефектом (МКЕ) (рис. 25). У цих структурах під дією відносно слабкого прикладеного магнітного поля ( $\sim 10$  мТ) відбувається магнітне перемикання структур із стану “синтетичний феромагнетик” в стан

“синтетичний антиферромагнетик” і спостерігається гігантська ізотермічна зміна магнітної ентропії ( $S \approx -10$  мДж см<sup>-3</sup> К<sup>-1</sup>) з поглинанням чи виділенням тепла. Це дозволяє ефективно керувати температурою розробленої структури та елементу електроніки, з яким вона знаходиться в безпосередньому тепловому контакті. Показано, що запропоновані структури можуть бути більш ефективними за кращі існуючі об’єми магнітокалоричні матеріали. Оскільки МБН виготовлені виключно на основі перехідних металів, це визначає їх високу економічну доцільність та толерантність до довікілля.

Ідея роботи полягає у використанні непрямої міжшарової взаємодії (РККІ-типу) між шарами сильних феромагнетиків: вільним ( $F_{\text{free}}$ ) і закріпленим ( $F_{\text{pin}}$ ) багатшарової наноструктури  $F_{\text{free}}/N/f/N/F_{\text{pin}} = \text{Fe}/(\text{Cr}/\text{Fe}_x\text{Cr}_{100-x})/\text{Cr}/\text{Fe}$  для гігантського підсилення впливу невеликого зовнішнього магнітного поля на магнітний стан внутрішнього шару розбавленого феромагнетика  $f$  в околі його температури Кюрі  $T_C^f$ . Перемикання магнітного моменту зовнішнього шару  $F_{\text{free}}$  з паралельної в антипаралельну конфігурацію по відношенню до моменту закріпленого шару  $F_{\text{pin}}$  і навпаки змінює ефективну температуру Кюрі шару  $f$  за рахунок зміни в значенні ефективного обмінного поля, що створюється РККІ взаємодією з зовнішніми феромагнітними шарами  $F_{\text{free}}$  і  $F_{\text{pin}}$  (рис. 25, а, б). Як результат, в антипаралельному стані шар  $f$  розмагнічений (ефективне обмінне поле нехтовно мале), а в паралельному стані він впорядкований (сильне ефективне обмінне поле). Перемикання магнітних конфігурацій відбувається за рахунок перемагнічування зовнішнього феромагнітного шару  $F_{\text{free}}$ , який водночас виступає індикатором зміни ентропії в системі. Зміна коерцитивної



**Рис. 25.** Схематичне зображення керованого полем перемикання магнітного впорядкування в магнітних багатшарових наноструктурах з композитним прошарком типу немагнітний/слабомагнітний/немагнітний (N/f/N) прошарок і сильним непрямым обмінним зміщенням. Композитний прошарок N/f/N сконструйований таким чином, що на тонкий внутрішній прошарок  $f$  впливають два внески від РККІ, які віднімаються (а), або додаються (б) в залежності від взаємної орієнтації магнітних моментів шарів зовнішніх сильних феромагнетиків  $F_{\text{free}}$  і  $F_{\text{pin}}$ . (а) Позначення лівого  $H_C^{\uparrow\downarrow}$  та правого  $H_C^{\uparrow\uparrow}$  коерцитивних полів на петлі гістерезису шару  $F_{\text{free}}$ . (д) Модельний аналіз температурних залежностей коерцитивності. Голубим та оранжевим кольором зображені праві та ліві коерцитивні поля  $H_c$  шару  $F_{\text{free}}$  для зразка з  $t_f = 1$  нм (віднімається магнітостатичний зсув). Суцільні чорні та оранжеві лінії відповідають підгонці експериментальних даних з використанням моделі, розвинутої в роботі.

сили в залежності від напрямку перемагнічування  $F_{\text{free}}$  залежить від магнітного стану шару  $f$  і відображає зміну ентропії в системі (рис. 25, с, d).

В запропонованій нами конструкції, для того щоб істотно змінити магнітний порядок прошарку  $f$  поблизу його температури Кюрі  $T_C^f$ , використовується сильний ефект підмагнічування слабого феромагнетика (*proximity effect*), індукований сильною РККІ взаємодією на інтерфейсах із сильними феромагнетиками, сфокусований на досить тонкий слабоферомагнітний внутрішній прошарок  $f$  (рис. 25, а, b). Товщина прошарку  $f$  має бути достатньо невеликою, щоб значно не перевищувати глибину проникнення РККІ обміну  $i$ , як правило, не перевищує декілька моноатомних шарів.

Приведені рекомендації для практичного застосування розроблених багатошарових наноструктур.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі представлені результати комплексного дослідження магнітних статичних і динамічних властивостей багатошарових наноструктур з температурно-залежними міжшаровими обмінними взаємодіями – прямою і непрямою – через прошарки слабких розбавлених феромагнітних сплавів; магнітних властивостей плівок розбавлених феромагнітних сплавів, як основних компонентів вищезазначених багатошарових наноструктур; та спінтронних пристроїв, побудованих на основі досліджених багатошарових наноструктур, з температурно індукованим перемиканням магнітних станів.

Були виконані відповідні необхідні експериментальні і теоретичні наукові дослідження і вперше отримані нові наукові результати:

1. Вперше запропоновано та реалізовано новий тип міжшарової обмінної взаємодії в магнітних багатошарових наноструктурах – температурно залежний обмін між шарами сильних феромагнетиків через прошарок розбавленого слабо феромагнітного сплаву, температура Кюрі якого є набагато нижчою, порівняно із шарами сильних феромагнетиків.
2. Вперше запропоновано та створено модифікований спіновий вентиль з прошарком розбавленого феромагнітного сплаву між шарами сильних феромагнетиків, один із яких є вільним із одновісною магнітною анізотропією, а другий – закріпленим із однонаправленою магнітною анізотропією, як температурно чутливий спінтронний пристрій - термомагнітний Кюрі-перемикач. Показано, що Кюрі-перемикач є ефективним інструментом для дослідження температурних, польових і кутових залежностей параметрів обмінної взаємодії в шаруватих наноструктурах.
3. Вперше запропоновано і експериментально реалізовано термомагнітний контроль міжшарової обмінної взаємодії та намагніченості в магнітних багатошарових наноструктурах  $F_1/f/F_{2\text{ pin}}$  з прошарками розбавленого феромагнетика  $f$ , шляхом їх переходу через точку Кюрі в прошарку  $f$ . Показано, що взаємодія між шарами  $F_1$  і  $F_{2\text{ pin}}$  через прошарок  $f$  залежить від температури і зникає при нагріві структури до ефективної температури Кюрі

для матеріалу прошарку  $f$ . При цьому, під впливом прикладеного невеликого магнітного поля, магнітні моменти шарів  $F_1$  і  $F_{2\text{pin}}$  впорядковуються антипаралельно, а магнітний момент  $F_1/f/F_{2\text{pin}}$  прямує до нуля, тобто відбувається магнітне перемикання. Термомагнітний ефект, що спостерігається, є дуже сильним – при зміні прикладеного магнітного поля всього в декілька десятків ерстед температура переходу змінюється на сотні К. Це відкриває новий шлях для контролю намагніченості в магнітних нанопристроях. Встановлено, що магнітне перемикання може бути досягнуто або зміною температури, або магнітного поля, або комбінацією обох параметрів.

4. Вперше розроблено феноменологічну теорію міжшарової обмінної взаємодії та температурної залежності намагніченості в структурі  $F_1/f/F_{2\text{pin}}$ . Виявлено, що в обмінній взаємодії між шарами сильних феромагнетиків через прошарок розбавленого слабого феромагнітного сплаву на інтерфейсі між сильним і слабким феромагнетиками визначальну роль відіграє ефект підмагнічування (*proximity effect*), який спричиняє неоднорідний розподіл намагніченості в прошарку розбавленого феромагнітного сплаву та суттєво підвищує його ефективну температуру Кюрі, що приводить до сильної нелінійної залежності міжшарового обміну від товщини прошарку та від концентрації магнітної компоненти в розбавленому феромагнітному сплаві.
5. Вперше виявлено, що в плівках розбавлених феромагнітних сплавів  $\text{Ni}_x\text{Cu}_{100-x}$ , осаджених методами магнетронного напорошування і електронно-променевого осаджування, які характеризуються необмеженою взаємною розчинністю компонентів, спостерігається композиційне і магнітне розшарування. Встановлено, що дане розшарування спричинене магнітоіндукованим ефектом при осаджуванні плівок. Більш сильно воно проявляється у сплавах із вищою концентрацією магнітної компоненти і приводить до нелінійної залежності температури Кюрі  $\text{Ni}_x\text{Cu}_{100-x}$  від концентрації магнітної складової.
6. Вперше експериментально продемонстровано послаблення ефекту підмагнічування на інтерфейсі між сильним і слабким феромагнетиками та покращення чіткості термомагнітного перемикання в Кюрі-перемикачі шляхом застосування прошарку розбавленого феромагнітного сплаву з градієнтним розподілом концентрації магнітної компоненти по товщині прошарку.
7. Вперше запропоновано і експериментально досліджено температурно чутливий магнітний тунельний контакт, як прототип елемента магнітної пам'яті, з термомагнітним перемиканням магнітних та резистивних станів в процесі нагрівання при проходженні електричного струму порогової величини через таку структуру.
8. Вперше запропоновано нову концепцію термомагнітного перемикання в магнітних багатшарових наноструктурах, в яких поєднуються і конкурують, в залежності від температури, непряма та пряма обмінні

міжшарові взаємодії. Запропоновано температурне перемикання характеру міжшарового обміну в магнітних багатошарових наноструктурах з температурно залежною обмінною взаємодією – із прямого обміну феромагнітного типу, характерного для так званого синтетичного феромагнетика при нижчих температурах, в непрямий обмін антиферомагнітного типу, характерного для так званого синтетичного антиферомагнетика, чи синтетичного феримагнетика, при більш високих температурах. При невеликій зміні температури пряма обмінна взаємодія, відповідальна за феромагнітне впорядкування в структурі, вимикається, а непрямий обмінна взаємодія, відповідальна за антиферомагнітне впорядкування, вмикається, і при цьому відбувається перемикання магнітного і резистивного станів структури. Перемикання відбувається за відсутності зовнішнього магнітного поля, на протигагу термомагнітному Кюрі-перемикачу.

9. Вперше методом феромагнітного резонансу досліджено динамічні магнітні властивості багатошарових наноструктур з температурно регульованим обміном між шарами сильних феромагнетиків через прошарок розбавленого феромагнітного сплаву. Виявлено, що міжшарова обмінна взаємодія сильно впливає на резонансні поля шарів сильних феромагнетиків, різкі зміни яких спостерігаються поблизу точки фазового переходу – точки Кюрі – слабомагнітного прошарку. Встановлено, що основними параметрами слабомагнітного прошарку, які впливають на магнітний резонанс в системі, є довжина обмінної взаємодії, ефективна намагніченість насичення і ефективна температура Кюрі, значення яких суттєво відрізняються від відповідних величин для об'ємних зразків розбавленого сплаву через ефект підмагнічування на інтерфейсах між сильними феромагнетиками і розбавленим сплавом. Отримані результати є важливими для розробки високошвидкісних магнітних нанопристроїв на основі спін-термоелектронного керування.
10. Вперше експериментально досліджено і теоретично проаналізовано процеси, які визначають релаксацію магнітних моментів в обмінно-зв'язаній системі феромагнітних наночарів, зв'язок між якими є температурно-залежним, а один із шарів характеризується сильною однонаправленою магнітною анізотропією. Виявлено, що наявність міжшарового зв'язку якісно змінює характер дисипативних процесів і приводить до збільшення або зменшення ефективного коефіцієнта дисипації системи. Показано, що підсилення міжшарового зв'язку призводить до анізотропного в площині характеру релаксації намагніченості у всій системі. Отримані результати вказують шляхи керування дисипативними процесами в новітніх високошвидкісних багатошарових магнітних наноструктурах, які є перспективними для практичних застосувань в галузі надшвидкісної спінтроники та мікрохвильової техніки.
11. Вперше запропоновано і розроблено інноваційний підхід до локальної температурної стабілізації мікророзмірних елементів електроніки із

застосуванням магнітних багатошарових наноструктур з гігантським магнітокалоричним ефектом. В цих структурах шари сильних феромагнетиків розділені прошарками розбавлених феромагнітних сплавів в парамагнітному стані. Ідея роботи полягає у використанні непрямої міжшарової обмінної взаємодії (РККІ-типу) для підсилення дії зовнішнього магнітного поля на прошарок розбавленого феромагнетика. В цих структурах в процесі прикладання незначного магнітного поля ( $\sim 10$  мТ) відбувається різка зміна характеру непрямого міжшарового обміну через прошарок розбавленого феромагнетика в околі його точки Кюрі і спостерігається гігантська ізотермічна зміна магнітної ентропії ( $S \approx -10$  мДж  $\text{см}^{-3} \text{K}^{-1}$ ) з поглинанням чи виділенням тепла. Це дозволяє ефективно керувати температурою цієї структури та мікророзмірного елемента електроніки, з яким вона може знаходитись в безпосередньому тепловому контакті.

12. Розроблено синтетичний антиферомагнетик з температурно індукованим перемиканням магнітних станів, як основа майбутніх спін-термо-електронних нанопристроїв спінтроніки. Синтетичний антиферомагнетик являє собою два шари сильних феромагнетиків, розділених прошарками різного типу. Описано і порівняно два механізми температурно-індукованого перемикання намагніченості в магнітних багатошарових наноструктурах з різними типами міжшарового обміну через різноманітні прошарки. Запропоновано два типи магнітних наноструктур: (і) структури з однорідними прошарками в яких реалізовано конкуренцію як прямого, так і непрямого міжшарових обмінних взаємодій; (іі) структури з композитними прошарками в яких реалізовано повністю непрямий обмінний зв'язок феромагнітного і антиферомагнітного типів. Ключовим елементом конструкції прошарків є слабomagнітний шар розбавленого феромагнітного сплаву, при переході якого через власну температуру Кюрі відбувається перемикання взаємного впорядкування магнітних моментів складових шарів із паралельного в антипаралельний стан, тобто із стану *синтетичного феромагнетика* в стан *синтетичного антиферомагнетика*. Результати експериментальних магнітних статичних і динамічних вимірів підтвержені детальними модельними теоретичними розрахунками. Ці результати є важливими для прикладних застосувань магнітних багатошарових наноструктур з термокерованим перемиканням характеру непрямого міжшарового обміну у спін-термо-електронних пристроях.
13. Вперше методом феромагнітного резонансу досліджено температурно регульований міжшаровий обмін в магнітних багатошарових наноструктурах де два шари сильних феромагнетиків розділені слабomagнітним прошарком з градієнтом складу уздовж його товщини. Використання прошарку градієнтного типу значно поліпшує ефективну однорідність обмінної взаємодії в багатошаровій структурі і призводить до значно вужчого температурного діапазону магнітного перемикання в структурі, порівняно із використанням прошарку із фіксованою



композицією. Отримані результати були використані при проектуванні і оптимізації багат шарових наноструктур з термічно керованими магнітними властивостями.

14. Вперше розроблені магнітні багат шарові наноструктури на основі шарів розбавлених феромагнітних сплавів та немагнітних прошарків (Fe-Cr)/Cr з міжшаровою обмінною взаємодією антиферомагнітного типу, константа взаємодії якої може налаштовуватись в широких межах ( $0,004 \div 0,235$  erg/cm<sup>2</sup>), в залежності від концентрації магнітної компоненти в шарах розбавленого сплаву Fe-Cr та їх товщини. Виявлено, що зростання концентрації атомів заліза на інтерфейсі (Fe-Cr)/Cr ефективно підсилює міжшарову обмінну взаємодію через зростання магнітної поляризації на (Fe-Cr)/Cr інтерфейсах.
15. Досліджено динамічний обмін між шарами антиферомагнетика і феромагнетика через прошарок немагнітного металу та його вплив на спінову динаміку в такій тришарових наноструктурі. Динамічний ФМ-АФМ обмін, опосередкований через електрони провідності в шарі НМ, виникає при феромагнітному резонансі (ФМР) в ФМ шарі через ефекти спінової накачки в немагнітний прошарок, переносу та акумуляції кутового моменту чистого спінового струму, генерованого ФМ шаром, в обидва ФМ та АФМ шари. Експериментально встановлено, що динамічний ФМ-АФМ обмін призводить до збільшення ширини лінії ФМР і зміщення резонансного магнітного поля шару ФМ, що надає інформацію про взаємодію нерівноважної провідності спінів електронів і локалізованих моментів АФМ. Виявлено, що індукований внесок спінової накачки в ширину лінії ФМР обернено пропорційний товщині ФМ шару. Показано, що ця товщинна залежність, ймовірно, виникає через дисипативну динаміку вільних і локалізованих спінів в шарі АФМ. На основі формалізму Онзагера теоретично розраховано додаткове затухання Гілберта в ФМ шарі в системі АФМ/НМ/ФМ з урахуванням спінової накачки і акумуляції в обох ФМ і АФМ шарах (О.Гомонай). Відокремлено внесок від ефекту спінової накачки в ширину лінії ФМР і показано його залежність зі зміною товщини шару ФМ. Проаналізовані фізичні механізми спостережуваних експериментальних залежностей і показано складний взаємозв'язок між спінами електронів провідності і ґратки в п'яти ефективних підсистемах структури. Експериментально спостережувана зворотна залежність додаткового АФМ-індукованого затухання і резонансного поля від товщини шару ФМ підтверджує гіпотезу про вплив АФМ на динаміку ФМ шару і добре узгоджується з нашими теоретичними передбаченнями. Отримані результати забезпечують більш глибоке розуміння механізмів, які роблять внесок в магнітну релаксацію в магнітних наноструктурах, що містять антиферомагнетика, дозволяють виявити роль динамічного міжшарового обміну в спіновій релаксації в цих структурах і можуть бути корисними при проектуванні швидкодіючих нанопристроїв спінтроники на основі антиферомагнетиків.

16. Вперше досліджено власну та стимульовану оточуючими шарами магнітну релаксацію у магнітом'якому шарі феромагнетика в багатошаровій композитній магнітній наноструктурі з різною величиною міжшарової обмінної взаємодії. Систематично вивчено внесок спінової накачки в динаміку намагніченості для паралельного, антипаралельного, а також неколінарного взаємного впорядкування магнітних моментів резонуючого і статичного магнітних шарів в багатошаровій наноструктурі, в якій резонуючий вільний шар динамічно взаємодіє через прошарок немагнітного металу через ефект спінової накачки із ключовим елементом структури - тришаровим синтетичним феримагнетиком (СФМ), шляхом контролю непрямої обмінної взаємодії у якому здійснюється перехід від паралельної до антипаралельної орієнтації резонуючого вільного шару і його найближчого інтерфейсу СФМ. Вперше виявлено, що характер отриманого магнітного затухання вільного шару є немонотонним: проміжна неколінарна магнітна конфігурація в структурі призводить до суттєво підвищеної спінової релаксації в системі. Така поведінка спричинена різною ефективністю поглинання та розсіювання у СФМ струму спінової накачки, яка інjektується вільним шаром. Додатково до збільшення поглинання спінового струму товстішим СФМ, виявлена також роль сильного спін-фліпу в неколінарному стані, а також модифікованої ефективної провідності в антипаралельному стані, аналогічну ефекту гігантського магнітоопору в СФМ. Отримані результати демонструють можливість налаштування магнітного затухання в магнітом'яких феромагнетиках шляхом відносно невеликих змін в геометрії магнітних багатошарових наноструктур.
17. Вперше запропоновано застосування непрямої обмінної взаємодії, як механізм для дослідження локального магнетизму в прошарках розбавлених феромагнітних сплавів в магнітних багатошарових наноструктурах з ефектом гігантського магнітоопору. Експериментально продемонстровано набуття магнітного моменту домішками Ni у прошарку розбавленого феромагнітного сплаву  $Ni_xCu_{100-x}$  в багатошаровій наноструктурі  $Co/Cu/Ni_xCu_{100-x}/Cu/Co$  із зміною концентрації  $x$ . На концентраційній залежності магнітоопору такий перехід проявляється як чітка сходинка в інтервалі  $x = 15 - 25$  ат.%. Таке різке зменшення магнітоопору зумовлене збільшенням спін-залежного розсіювання електронів на парамагнітних домішках у прошарку – атомах Ni, які набули атомний магнітний момент. Розроблений підхід може бути використаний у високочутливих дослідженнях надслабких магнітних перетворень і змін у тонких шарах із слабо вираженими магнітними властивостями.

Як загальний результат, у роботі з'ясовано закономірності і специфічні риси еволюції магнітних властивостей магнітних багатошарових наноструктур з температурно керованим міжшаровим обміном різного типу при зміні температури та вироблена концепція практичного застосування розроблених наноструктур в спінтронних пристроях.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

**Статті** в фахових наукових журналах, віднесених до першого **Q1** і другого **Q2** кuartилів відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports:

1. **A. F. Kravets**, A. N. Timoshevskii, B. Z. Yanchitsky, M. A. Bergmann, J. Buhler, S. Andersson, and V. Korenivski, “Temperature-controlled interlayer exchange coupling in strong/weak ferromagnetic multilayers: A thermomagnetic Curie-switch”, *Phys. Rev. B* 86, 214413 (2012). (**Q1**) *(Особисто дисертантом була сформована ідея досліджень, виготовлені дослідні зразки, проведено частину досліджень, аналіз та інтерпретування отриманих результатів, він брав участь у написанні і подачі статті).*
2. **A. F. Kravets**, Yu. I. Dzhzherya, A. I. Tovstolytkin, I. M. Kozak, A. Gryshchuk, Yu. O. Savina, V. A. Pashchenko, S. L. Gnatchenko, B. Koop, and V. Korenivski. “Synthetic ferrimagnets with thermomagnetic switching”, *Phys. Rev. B* 90, 104427 (2014). (**Q1**) *(Особисто дисертантом була сформована ідея досліджень, виготовлені дослідні зразки, проведено частину досліджень, аналіз та інтерпретування отриманих результатів, він брав участь у написанні і подачі статті).*
3. **A. F. Kravets**, A. I. Tovstolytkin, Yu. I. Dzhzherya, D. M. Polishchuk, I. M. Kozak, and V. Korenivski, “Spin dynamics in a Curie-switch”, *J. Phys.: Condens. Matter* 27, 446003 (2015). (**Q1**) *(Особисто дисертантом була сформована ідея досліджень, виготовлені дослідні зразки, проведено частину досліджень, аналіз та інтерпретування отриманих результатів, він брав участь у написанні і подачі статті).*
4. **A. F. Kravets**, D. M. Polishchuk, Yu. I. Dzhzherya, A. I. Tovstolytkin, V. O. Golub, and V. Korenivski, “Anisotropic magnetization relaxation in ferromagnetic multilayers with variable interlayer exchange coupling”, *Phys. Rev. B* 94, 064429 (2016). (**Q1**) *(Особисто дисертантом була сформована ідея досліджень, виготовлені дослідні зразки, проведено частину досліджень, аналіз та інтерпретування отриманих результатів, він брав участь у написанні і подачі статті).*
5. **A. F. Kravets**, D. M. Polishchuk, V. A. Pashchenko, A. I. Tovstolytkin, and V. Korenivski, “Current-driven thermo-magnetic switching in magnetic tunnel junctions”, *Appl. Phys. Lett.* 111, 262401 (2017). (**Q1**) *(Особисто дисертантом була сформована ідея досліджень, виготовлені дослідні зразки, проведено частину досліджень, аналіз та інтерпретування отриманих результатів, він брав участь у написанні і подачі статті).*
6. **A. F. Kravets**, A. N. Timoshevskii, B. Z. Yanchitsky, O. Yu. Salyuk, S. O. Yablonskii, S. Andersson, V. Korenivski, “Exchange- induced phase separation in Ni-Cu films”, *J. Magn. Magn. Mater.* 324, 2131 (2012). (**Q2**) *(Особисто дисертантом була сформована ідея досліджень, виготовлені дослідні зразки, проведено частину досліджень, аналіз та інтерпретування отриманих результатів, він брав участь у написанні і подачі статті).*
7. **A. F. Kravets**, O. V. Gomonay, D. M. Polishchuk, Yu. O. Tykhonenko-Polishchuk, T. I. Polek, A. I. Tovstolytkin, and V. Korenivski, “Effect of nanostructure layout on spin pumping phenomena in antiferromagnet / nonmagnetic metal / ferromagnet multilayered stacks”, *AIP Adv.* 7, 056312 (2017). (**Q2**) *(Особисто дисертантом була сформована ідея досліджень, виготовлені дослідні зразки, проведено частину досліджень, аналіз та інтерпретування отриманих результатів, він брав участь у написанні і подачі статті).*
8. Y. V. Kudryavtsev, A. K. Melnyk **A. F. Kravets**, V. V. Trachevskiy, and V. Korenivski,

“FMR evidence of spinodal decomposition of  $\text{Ni}_x\text{Cu}_{100-x}$  ( $0.5 < x < 1$ ) alloy films”, *Thin Solid Films* 603, 424-427 (2016). (Q2) (Особисто дисертантом була сформована ідея досліджень, виготовлені дослідні зразки, проведено аналіз та інтерпретування отриманих результатів, він брав участь у написанні і подачі статті).

9. D. M. Polishchuk, Yu. O. Tykhonenko-Polishchuk, E. Holmgren, **A. F. Kravets**, A. I. Tovstolytkin, and V. Korenivski, “Giant magnetocaloric effect driven by indirect exchange in magnetic multilayers”, *Phys. Rev. Mat.* 2, 114402 (2018). (Q1) (Особисто дисертантом був проведений аналіз та інтерпретування отриманих результатів, він брав участь у написанні і подачі статті).
10. D. M. Polishchuk, Yu. O. Tykhonenko-Polishchuk, E. Holmgren, **A. F. Kravets**, and V. Korenivski, “Thermally induced antiferromagnetic exchange in magnetic multilayers”, *Phys. Rev. B* 96, 104427 (2017). (Q1) (Особисто дисертантом був проведений аналіз та інтерпретування отриманих результатів, він брав участь у написанні і подачі статті).
11. D. M. Polishchuk, T. I. Polek, A. Kamra, **A. F. Kravets**, A. I. Tovstolytkin, A. Brataas, and V. Korenivski, “Spin relaxation in multilayers with synthetic ferrimagnets”, *Phys. Rev. B* 98, 144401 (2018). (Q1) (Особисто дисертантом був проведений аналіз та інтерпретування отриманих результатів, він брав участь у написанні і подачі статті).
12. D. M. Polishchuk, Yu. O. Tykhonenko-Polishchuk, V. Yu. Borynskyi, **A. F. Kravets**, A. I. Tovstolytkin, and V. Korenivski, “Magnetic hysteresis in nanostructures with thermally-controlled RKKY coupling”, *Nanoscale Res. Lett.* 13, 245 (2018). (Q2) (Особисто дисертантом був проведений аналіз та інтерпретування отриманих результатів, він брав участь у написанні і подачі статті).
13. D. M. Polishchuk, Yu. O. Tykhonenko-Polishchuk, **A. F. Kravets**, and V. Korenivski, “Thermal switching of indirect interlayer exchange in magnetic multilayers”, *Europhys. Lett.* 118, 37006 (2017). (Q2) (Особисто дисертантом був проведений аналіз та інтерпретування отриманих результатів, він брав участь у написанні і подачі статті).
14. D. M. Polishchuk, **A. F. Kravets**, Yu. O. Tykhonenko-Polishchuk, A. I. Tovstolytkin, and V. Korenivski, “Ferromagnetic resonance and interlayer exchange coupling in magnetic multilayers with compositional gradients”, *AIP Adv.* 7, 056307 (2017). (Q2) (Особисто дисертантом проведено був проведений аналіз та інтерпретування отриманих результатів, він брав участь у написанні і подачі статті).
15. Yu. O. Tykhonenko-Polishchuk, D. M. Polishchuk, T. I. Polek, D. D. Yaremkevych, **A. F. Kravets**, A. I. Tovstolytkin, A. N. Timoshevskii, and V. Korenivski, “Spin-dependent scattering and magnetic proximity effect in Ni-doped Co/Cu multilayers as a probe of atomic magnetism”, *J. Appl. Phys.* 125, 023907 (2019). (Q2) (Особисто дисертантом був проведений аналіз та інтерпретування отриманих результатів, він брав участь у написанні і подачі статті).

**Інші статті** в фахових журналах, **не віднесені** до першого Q1 і другого Q2 кваліфікаційних рівнів відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports:

16. **А. Ф. Кравец**, А. И. Товстольткін, И. М. Козак, Ю. О. Тихоненко, Ю. А. Савина, В. А. Пашенко, “Температурно-регулируемое межслойное обменное взаимодействие в многослойной структуре  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Ni}_{40}\text{Cu}_{60}/\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Mn}_{80}\text{Ir}_{20}$ ”, *Металлофиз. Новейш. Технол.* 35(12), 1675-1684 (2013). (Особисто дисертантом проведено частину досліджень, проведений аналіз та інтерпретування отриманих результатів, він брав участь у написанні і подачі статті).
17. I. M. Kozak, D. M. Polishchuk, **А. Ф. Кравец**, В. О. Голуб, V. Korenivski. “ФМР в

- обмінно-зв'язаних багат шарових структурах”, Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології, 13(1), 147 (2015). *(Особисто дисертантом проведено частину досліджень, проведений аналіз та інтерпретування отриманих результатів, він брав участь у написанні і подачі статті).*
18. D. M. Polishchuk, Yu. O. Tykhonenko-Polishchuk, **A. F. Kravets**, A. I. Tovstolytkin, Yu. I. Dzhezherya, A. M. Pogorily, and V. Korenivski, “Ferromagnetic resonance in nanostructures with temperature-controlled interlayer interaction”, *Low Temp. Phys.* 42, 762 (2016). *(Особисто дисертантом проведено частину досліджень, проведений аналіз та інтерпретування отриманих результатів, він брав участь у написанні і подачі статті).*
  19. Т. І. Полек, Д. Д. Яремкевич, І. М. Козак, **А. Ф. Кравець**, “Вплив параметрів магнітного та немагнітного шарів на процеси дисипації у багат шарових наноструктурах з антиферомагнітним компонентом”, *Журнал нано- та електронної фізики* 9, № 3, 03001(бсс) (2017). *(Особисто дисертантом проведено частину досліджень, проведений аналіз та інтерпретування отриманих результатів, він брав участь у написанні і подачі статті).*
  20. Ю. І. Джежеря, **А. Ф. Кравець**, І. М. Козак, А. Я. Вовк, А. Н. Погорельий, “Поля непрямых обменных взаимодействий в магнитных наногранулированных пленках”, *Журнал нано- та електронної фізики*, Т. 6, № 2, 02027(5сс) (2014). *(Особисто дисертантом проведено частину досліджень, проведений аналіз та інтерпретування отриманих результатів, він брав участь у написанні і подачі статті).*
  21. Ю. І. Горобець, Ю. І. Джежеря, **А. Ф. Кравець**, “Магнитное упорядочение в гранулированной системе”, *Физика твердого тела* 42(1), 121 (2000). *(Особисто дисертантом був проведений аналіз та інтерпретування отриманих результатів, він брав участь у написанні і подачі статті).*
  22. Ю. І. Джежеря, **А. Ф. Кравець**, І. М. Козак, Е. В. Шипиль, А. Н. Погорельий, “Влияние косвенного обменного взаимодействия на ферромагнитный резонанс в магнитных наногранулированных пленках”, *Журнал нано- та електронної фізики* 5(4), 04075(7сс) (2013). *(Особисто дисертантом проведено частину досліджень, проведений аналіз та інтерпретування отриманих результатів, він брав участь у написанні і подачі статті).*
  23. D. M. Polishchuk, T. I. Polek, V. Yu. Borynskyi, **A. F. Kravets**, A. I. Tovstolytkin, A. M. Pogorily, V. Korenivski, “Spin-current dissipation in a thin-film bilayer ferromagnet/antiferromagnet”, *Low Temp. Phys.* 46(8), 813 (2020). *(Особисто дисертантом був проведений аналіз та інтерпретування отриманих результатів, він брав участь у написанні і подачі статті).*
  24. D. M. Polishchuk, M. M. Kulyk, E. Holmgren, G. Pascuale, **A. F. Kravets**, and V. Korenivski, “Influence of nanosize effect and non-magnetic dilution on interlayer exchange coupling in Fe–Cr/Cr nanostructures”, *Ukr. J. Phys.* 65(10), 898 (2020). *(Особисто дисертантом був проведений аналіз та інтерпретування отриманих результатів, він брав участь у написанні і подачі статті).*

#### **Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації**

(10 обраних тез доповідей на конференціях із 29 )

25. Lytvynenko Ya.M., Polishchuk D.M., Tykhonenko-Polishchuk Yu.O., Rostas A.M., Kuncser V, **Kravets A.F.**, Tovstolytkin A.I., Korenivski V. Interlayer interaction in magnetic nanostructures with FeMn spacer // Abstract book of International Conference “Nanotechnology and Nanomaterials (NANO-2020)”, Lviv, 26–29 August 2020, p. 514.

26. D. M. Polishchuk, Yu. O. Tykhonenko-Polishchuk, E. Holmgren, **A. F. Kravets**, A. I. Tovstolytkin, and V. Korenivski, "Giant magnetocaloric effect driven by RKKY-exchange field in magnetic multilayers", Abstract book of the Joint European Magnetic Symposia (JEMS'2019), 26-30 August 2019, Uppsala, Sweden.
27. **A. F. Kravets**, D. M. Polishchuk, T. I. Polek, V. Yu. Borynskyi, A. I. Tovstolytkin, and V. Korenivski, "Coupled FMR modes and frequency enhancement in Py/FeMn bilayers under magnetic proximity effect", Proceedings of the 2019 IEEE 9th International Conference on Nanomaterials: Applications & Properties (NAP-2019), Part 2, ISBN 978-1-7281-2830-6, Odessa, Ukraine, September 15-20, 2019, p. 02M35-1.
28. D.M. Polishchuk, Yu.O. Tykhonenko-Polishchuk, T.I. Polek, **A.F. Kravets**, D.D. Yaremkevich, A.M. Pogorily, V. Korenivski. Thermal switching of indirect interlayer exchange coupling in Fe/FeCr/Fe multilayers, Abstract book of the International Research and Practice Conference: Nanotechnology and Nanomaterials (NANO-2018), 27-30 August 2018, Kyiv, Ukraine, p. 195.
29. T.I. Polek, D.M. Polishchuk, **A.F. Kravets**, A.I. Tovstolytkin, V. Korenivski. Static and dynamic magnetic properties of multilayers with synthetic ferrimagnets, Proceedings of the 2018 IEEE 8th International Conference on Nanomaterials: Applications & Properties (NAP-2018), September 9-14 2018, Zatoka, Ukraine, Part 2, ISBN 978-1-5386-5333-3, p. 02TSSPN15-1.
30. T. I. Polek, O. I. Tovstolytkin, **A. F. Kravets**, D. M. Polishchuk, V. Korenivski. Resonance and magnetic properties of Fe/Cr/Fe asymmetrical synthetic antiferromagnet. International Conference «Nanotechnology and nanomaterials» (NANO-2017) (23 – 26 August 2017, Chernivtsi, Ukraine), p. 249.
31. **A. Kravets**, D. Polishchuk, Y. Tykhonenko-Polishchuk, T. Polek, H. Gomonay, A. Tovstolytkin, A. Pogorily, and V. Korenivski. Effect of nanostructure layout on spin pumping phenomena in antiferromagnet/ nonmagnetic metal/ ferromagnet multilayered stacks. //Abstracts of the 61st Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, October 3 – November 4, 2016, New Orleans, Louisiana, USA. FT-07, p. 664.
32. **A. F. Kravets**, Yu. I. Dzhezherya, A. I. Tovstolytkin, I. M. Kozak, Yu. O. Tykhonenko, A. Gyschuk, Yu. O. Savina, V. A. Paschenko, S. L. Gnatchenko, B. C. Koop, V. Korenivski. Interlayer exchange and switching in spin-valves with weakly ferromagnetic and paramagnetic spacers. Digest book of the IEEE International Magnetics Conference, INTERMAG Europe 2014, Dresden, Germany, May 4-8, 2014, FE-8, pp. 2194-2195.
33. **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. Curie switch. Abstract book of Summer school and International research and practice conference: Nanotechnology and Nanomaterials (NANO-2014), 23–30 August 2014, Yaremche–Lviv, Ukraine, p. 204.
34. **A. F. Kravets**, A. N. Timoshevskii, B. Z. Yanchitsky, O. Y. Salyuk, S. O. Yablonskii, S. Andersson and V. Korenivski. Phase separation in Ni-Cu films induced by Ni-Ni exchange interaction // Abstract book of Joint MMM-Intermag Conference, January 14-18, 2013, Chicago, USA. BG-04, p. 164.

## АНОТАЦІЯ

**Кравець А. Ф. Магнітні властивості багатошарових наноструктур з температурно залежною міжшаровою обмінною взаємодією. – Наукова доповідь. Сукупність наукових статей.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.11 – магнетизм. – Інститут магнетизму Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України, Київ, 2021.

У дисертаційній роботі представлені результати комплексного дослідження магнітних статичних і динамічних властивостей багатошарових наноструктур з температурно залежними міжшаровими обмінними взаємодіями (прямою і непрямою) через прошарки слабких розбавлених феромагнітних сплавів; магнітних властивостей плівок розбавлених феромагнітних сплавів, як основних компонентів вищезазначених багатошарових наноструктур та спітронних пристроїв, побудованих на їх основі, з температурно індукованим перемиканням магнітних станів. Запропоновано новий тип міжшарової обмінної взаємодії в магнітних багатошарових наноструктурах – температурно залежний обмін між шарами сильних феромагнетиків через прошарок розбавленого слабо феромагнітного сплаву. Запропоновано модифікований спіновий вентиль з прошарком розбавленого феромагнітного сплаву, як температурно чутливий спітронний пристрій - термомагнітний Кюрі-перемикач (КП). Виявлено, що в обмінній взаємодії між шарами сильних феромагнетиків через прошарок розбавленого слабо феромагнітного сплаву визначальну роль відіграє ефект підмагнічування (*proximity effect*) на інтерфейсі між сильним і слабким феромагнетиками, який спричиняє неоднорідний розподіл намагніченості в прошарку розбавленого феромагнітного сплаву і приводить до сильної залежності міжшарового обміну від товщини прошарку та концентрації магнітної компоненти в ньому. Знайдено, що в плівках розбавлених феромагнітних сплавів, осаджених методами магнетронного напорошування і електронно-променевого осаджування, спостерігається магнітне композиційне розшарування, спричинене магнітоіндукованим ефектом в процесі осаджування плівок. З метою послаблення ефекту підмагнічування на інтерфейсі між сильним і слабким феромагнетиками та покращення чіткості термомагнітного перемикання в КП синтезовано прошарок розбавленого феромагнітного сплаву з градієнтним розподілом концентрації магнітної компоненти. Запропоновано температурно чутливий магнітний тунельний контакт, як елемент магнітної пам'яті з термомагнітним перемиканням магнітних станів. Запропоновано температурне перемикання характеру міжшарового обміну в магнітних багатошарових наноструктурах з температурно залежною обмінною взаємодією – із прямого обміну феромагнітного типу (*синтетичний феромагнетик*) в непрямий обмін антиферомагнітного типу (*синтетичний феримагнетик*). Виявлено кероване температурою анізотропне затухання спінової динаміки в термомагнітному перемикачі. Запропоновано і досліджено гігантський

магнітокалоричний ефект, зумовлений непрямим обміном в магнітних багатошарових структурах з прошарками розбавлених ферромагнітних сплавів в парамагнітному стані. Запропоновано застосування непрямой обмінної взаємодії, як механізм для дослідження локального магнетизму в тонких плівках сплавів розбавлених ферромагнетиків.

**Ключові слова:** антиферромагнетик, ефект підмагнічування, дисипативні ефекти, Кюрі-перемикач, магнітні багатошарові наноструктури, магнітна динаміка, магнітокалоричний ефект, міжшарова обмінна взаємодія, намагніченість, непряма обмінна взаємодія, пряма обмінна взаємодія, розбавлений ферромагнетик, спін-поляризований струм, спінова накачка, спінтроніка, температурно керований міжшаровий обмін, температура Кюрі, тунельний контакт, ферромагнітний резонанс, ферромагнетик.

## АННОТАЦІЯ

**Кравець А. Ф. Магнитные свойства многослойных наноструктур с температурно зависимым межслойным обменным взаимодействием. – Научный доклад за совокупностью научных статей.**

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.11 – магнетизм. – Институт магнетизма Национальной академии наук Украины и Министерства образования и науки Украины, Киев, 2021.

В работе представлены результаты комплексного исследования магнитных статических и динамических свойств многослойных наноструктур с температурно зависимыми прямой и непрямой межслойными обменными взаимодействиями. Предложен новый тип межслойной обменного взаимодействия в магнитных многослойных наноструктурах - температурно зависимый обмен между слоями сильных ферромагнетиков через слой разбавленного слабо ферромагнитного сплава. Предложен модифицированный спиновый вентиль с прослойкой разбавленного ферромагнитного сплава, как температурно чувствительное спинтронное устройство - термомагнитный Кюри-переключатель (КП). Выявлено, что в обменном взаимодействии между слоями сильных ферромагнетиков через слой разбавленного слабого ферромагнитного сплава определяющую роль играет эффект подмагничивания (proximity effect) на интерфейсе между сильным и слабым ферромагнетиками, который вызывает неоднородное распределение намагниченности в прослойке разбавленного ферромагнитного сплава и приводит к сильной зависимости межслойного обмена от толщины слоя. Найдено, что в пленках разбавленных ферромагнитных сплавов, осажденных методами магнетронного напыления и электронно-лучевого осаждения, наблюдается магнитное расслоение, вызванное магнито-индуцированным эффектом в процессе осаждения пленок. С целью ослабления эффекта подмагничивания на интерфейсе между сильным и слабым ферромагнетиками и улучшения четкости термомагнитного переключения в КП синтезирован слой разбавленного ферромагнитного сплава с градиентным распределением концентрации магнитной компоненты по



толщине прослойки. Предложено температурно чувствительный магнитный туннельный контакт, как элемент магнитной памяти с термомагнитным переключением магнитных состояний. Предложено температурное переключения характера межслойного обмена в магнитных многослойных наноструктурах с температурно зависимой обменным взаимодействием - с прямого обмена ферромагнитного типа (*синтетический ферромагнетик*) в косвенный обмен антиферромагнитного типа (*синтетический ферримагнетик*). Выявлено управляемое температурой анизотропное затухание спиновой динамики в термомагнитном переключателе. Предложено и исследовано гигантский магнетокалорический эффект, обусловленный косвенным обменом в магнитных многослойных структурах с прослойками разбавленных ферромагнитных сплавов в парамагнитном состоянии. Предложено применение косвенного обменного взаимодействия, как механизм для исследования локального магнетизма в тонких пленках сплавов разбавленных ферромагнетиков.

**Ключевые слова:** антиферромагнетик, эффект подмагничивания, диссипативные эффекты, Кюри-переключатель, магнитные многослойные наноструктуры, магнитная динамика, магнетокалорический эффект, межслойная обменное взаимодействие, намагниченность, косвенная обменное взаимодействие, прямая обменное взаимодействие, разбавленный ферромагнетик, спин-поляризованный ток, спиновая накачка, спинтроника, температурно управляемый межслойной обмен, температура Кюри, туннельный контакт, ферромагнитный резонанс, ферромагнетик.

## SUMMARY

**Kravets A.F. Magnetic properties of multilayer nanostructures with temperature-dependent interlayer exchange interaction.** – Scientific report. Collection of scientific manuscripts.

The thesis for the Degree of Doctor of Science in Physics and Mathematics by specialty 01.04.1 – Magnetism. – Institute of Magnetism of the National Academy of Sciences of Ukraine and the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2021.

This thesis presents the results of a comprehensive study of the magnetic static and dynamic properties of multilayer nanostructures with temperature-dependent direct and indirect interlayer exchange interactions. A new type of interlayer exchange interaction in magnetic multilayer nanostructures is proposed - a temperature-dependent exchange between layers of strong ferromagnets through a layer of a diluted weakly ferromagnetic alloy. A modified spin valve with an interlayer of a diluted ferromagnetic alloy is proposed as a temperature sensitive spintronic device - a thermomagnetic Curie switch. It has been revealed that the proximity effect at the strong ferromagnet / weak ferromagnet interfaces plays a decisive role in the exchange interaction between layers of strong ferromagnets through a layer of a diluted weak ferromagnetic alloy, which causes an inhomogeneous distribution of magnetization in

the interlayer of a diluted ferromagnetic alloy and leads to a strong dependence of the interlayer exchange on the thickness of the layer. It was found that in films of diluted ferromagnetic alloys deposited by magnetron sputtering and electron-beam deposition, magnetic separation is observed, which is caused by a magnetically induced effect in the process of film deposition. In order to weaken the effect of magnetization at the strong ferromagnet / weak ferromagnet interfaces and to improve the clarity of thermomagnetic switching in Curie switches, a layer of a diluted ferromagnetic alloy with a gradient distribution of the concentration of the magnetic component is developed. A temperature-sensitive magnetic tunnel contact is proposed as an element of magnetic memory with thermomagnetic switching of magnetic states. Temperature switching of the nature of interlayer exchange in magnetic multilayer nanostructures with a temperature-dependent exchange interaction is proposed - from direct exchange of the ferromagnetic type (synthetic ferromagnet) to indirect exchange of the antiferromagnetic type (synthetic ferrimagnet). Temperature-controlled anisotropic damping of spin dynamics in a thermomagnetic switch is revealed. A giant magnetocaloric effect due to indirect exchange in magnetic multilayer structures with layers of dilute ferromagnetic alloys in the paramagnetic state has been proposed and investigated. The use of indirect exchange interaction is proposed as a mechanism for studying local magnetism in thin films of dilute ferromagnet alloys.

**Keywords:** antiferromagnet, Curie switch, Curie temperature, direct exchange interaction, diluted ferromagnet, dissipative effects, interlayer exchange coupling, ferromagnetic resonance, ferromagnet, magnetization effect, magnetic multilayer nanostructures, magnetic dynamics, magnetocaloric effect, magnetization, magnetic dynamics, proximity effect, spin-polarized current, spin pumping, spintronics, temperature-controlled interlayer exchange coupling, tunnel contact.

Підписано до друку 08.04.2021 р.  
Формат 60x84/16. Папір офсетний. Гарнітура Times. Друк ризографічний.  
Умовн. друк. арк. 1,9. Обл.-вид. арк. 2,09.  
Тираж 100 прим. Зам. № 0-39.