

ВІДГУК
офіційного опонента
на дисертаційну роботу Кравця Анатолія Федоровича
«Магнітні властивості багатошарових наноструктур з температурно
залежною міжшаровою обмінною взаємодією»,
що подана на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук
за спеціальністю 01.04.11 – магнетизм

Актуальність теми дисертації. Дисертаційна робота А.Ф. Кравця присвячена вирішенню актуальної проблеми фізики сучасного магнетизму, що пов'язана з розробкою нових принципів ефективного управління магнітними станами багатошарових наноструктур, перспективних для їх подальшого практичного застосування в області спінtronіки. Для своєї докторської дисертації здобувач обрав тематично пов'язані роботи з питань магнітних статичних і динамічних властивостей багатошарових наноструктур з різними типами температурно-залежної міжшарової взаємодії. Ці питання є актуальними через можливість практичного застосування таких наноструктур в різноманітних пристроях магнітної спінtronіки. Розв'язування низки питань, пов'язаних з визначенням впливу непрямої обмінної взаємодії на магнітні властивості багатошарових наноструктур, підвищує актуальність дисертації, як дослідження фундаментального характеру. Актуальність теми дисертаційної роботи також підтверджується тим, що дисертація є частиною досліджень, які проводились у рамках восьми бюджетних науково-дослідних робіт у відділі фізики плівок Інституту магнетизму Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України, в яких здобувач був відповідальним виконавцем або виконував обов'язки керівника теми.

Загальна характеристика роботи. Дисертація представлена як наукова доповідь за сукупністю наукових статей за вказаною науковою тематикою. П'ятнадцять з двадцяти чотирьох публікацій, які розкривають основні наукові результати дисертації, опубліковані у наукових фахових виданнях, що належать до першого Q_1 та другого Q_2 квартилів міжнародної

науково-метричної класифікації SCImago Journal and Country Rank та Journal Citation Reports.

Дисертація складається із анотації українською та англійською мовами, основної частини та одного додатку. До основної частини увійшли вступ, шість розділів та висновки. Розділами дисертації є публікації здобувача, у яких відображені та обґрунтовані наукові результати, що винесені у висновки дисертаційного дослідження. Додаток містить список публікацій здобувача за темою дисертації. Особистий внесок здобувача чітко окреслений у вступі. Автореферат досить повно відображає зміст дисертації. Усі результати досліджень, що винесені на захист, своєчасно і повною мірою опубліковані у наукових фахових виданнях та пройшли надійну апробацію на міжнародних конференціях. За змістом дисертаційна робота повністю відповідає паспорту спеціальності 01.04.11 – магнетизм.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, показано зв'язок роботи з науковими програмами та темами, визначено об'єкт, мету, задачі та методи дослідження, визначено наукову новизну та практичне значення результатів роботи, надано інформацію про апробацію результатів дисертаційного дослідження, приведено перелік публікацій здобувача за темою дисертації.

У першому розділі приведені результати досліджень магнітних властивостей плівок сплавів розбавлених феромагнетиків Ni_xCu_{100-x} та зроблено висновок про доцільність їх використання у якості температурно-чутливих прошарків в магнітних багатошарових наноструктурах з температурно-залежним міжшаровим обміном.

У другому розділі запропоновано новий тип температурно-залежного міжшарового обміну та розглянуто Кюрі-перемикач, як модифікований спіновий вентиль з температурно-чутливим прошарком розбавленого феромагнітного сплаву і прототип спінtronного пристрою з температурним перемиканням магнітних і резистивних станів. Цей пристрій є ефективним інструментом для дослідження польових, температурних і кутових залежностей температурно-залежного міжшарового обміну. В цьому розділі наведені експериментальні результати польових і температурних

залежностей намагніченості Кюрі-перемикача з різною товщиною і складом прошарку розбавленого феромагнетику та проведене їх порівняння із результатами теоретичних розрахунків в рамках розробленої моделі температурно-залежного міжшарового обміну. Отримано аналітичні вирази для поля ефективного магнітного перемикання Кюрі-перемикача та його температурної залежності. При цьому враховано суттєво нелінійний характер обмінної взаємодії та локальної намагніченості в прошарку. Отримано якісне узгодження експериментальних і теоретичних результатів.

Третій розділ присвячений динамічним магнітним властивостям Кюрі-перемикача: залежностям резонансних полів і параметрів магнітного затухання феромагнітного резонансу шарів сильних феромагнетиків, які входять до складу багатошаровоїnanoструктур; від геометрії експерименту, яка пов'язана з анізотропією; від складу та товщини прошарку розбавленого феромагнетику Кюрі-перемикача. Приведено порівняння експериментальних результатів та результатів теоретичних розрахунків в рамках моделі спінової динаміки Кюрі-перемикача, яка розроблена в дисертації. Отримано якісне узгодження цих результатів та зроблено висновок про анізотропний характер магнітного затухання в Кюрі-перемикачі, яке можна контролювати шляхом зміни геометрії експерименту.

В четвертому розділі приведені результати експериментальних досліджень температурних і польових залежностей намагніченості багатошарових nanoструктур з температурним перемиканням характеру міжшарового обміну від прямого обміну феромагнітного типу до непрямого обміну антиферомагнітного типу. Таке перемикання здійснюється за відсутності прикладеного магнітного поля, на відміну від Кюрі-перемикача.

П'ятий розділ присвячено дослідженню впливу ефекту спінової накачки на спінову динаміку в магнітних багатошарових nanoструктурах на основі антиферомагнетиків і синтетичних феромагнетиків під час феромагнітного резонансу. Запропоновано механізм керування магнітним затуханням в системі шляхом зміни величини спінової накачки.

У шостому розділі приведені результати практичного застосування в галузі спінtronіки магнітних багатошарових nanoструктур з різними типами

обмінної міжшарової взаємодії та температурно-керованим магнітним станом. Розроблено і досліджено терномагнітний тунельний контакт з індукованим струмом перемиканням магнітного і резистивного стану. Також досліджені магнітні багатошарові наноструктури з гіантським магнітокалоричним ефектом, який генерується при переході такої структури із стану «синтетичний феромагнетик» в стан «синтетичний антиферомагнетик».

У висновках відображені найбільш важомі результати роботи.

Новизна наукових положень і висновків. Робота містить багато нових цікавих результатів, корисних як для фундаментальної науки, так і для їх практичного застосування. Із представлених в дисертації нових результатів, на мій погляд, як найбільш важливі, необхідно відзначити наступні.

1. В роботі вперше запропоновано і досліджено новий вид міжшарової обмінної взаємодії – температурно-контрольований обмін між шарами сильних феромагнетиків через прошарок слабкого розбавленого феромагнетика, магнітний стан якого залежить від температури та впливає на обмін між шарами сильних феромагнетиків. Це самого часу було недослідженім аспектом міжшарової взаємодії, якою можна керувати за допомогою зміни температури. В роботі не лише запропоновано і досліджено цей тип взаємодії, а й запропоновано низку практичних пристройів, побудованих з використанням отриманих результатів.
2. Для Кюрі-перемикача структурного типу $F_1/f/F_{2\text{pin}}$ запропоновано феноменологічну модель міжшарової обмінної взаємодії сильно магнітних шарів F_1 і F_2 за умов температурної залежності намагніченості слабомагнітного прошарку f . Виявлено, що у взаємодії шарів F_1 і F_2 через прошарок розбавленого сплаву f визначальну роль відіграє ефект «блізькості» або підмагнічування (*proximity effect*), на інтерфейсі між F і f феромагнетиками, який спричиняє неоднорідний розподіл намагніченості в прошарку f розбавленого сплаву та суттєво підвищує його ефективну

температуру Кюрі. Варто очікувати, що ця модель знайде в подальшому більш детальну теоретичну розробку.

3. Вперше експериментально досліджено і теоретично проаналізовано процеси, які визначають релаксацію магнітних моментів в обмінно-зв'язаній системі феромагнітних наношарів, зв'язок між якими є температурно-залежним, а один із шарів характеризується сильною односторонньою магнітною анізотропією. Виявлено, що наявність міжшарового зв'язку якісно змінює характер дисипативних процесів і приводить до збільшення або зменшення ефективного коефіцієнта дисипації системи в залежності від геометрії експерименту.
4. Запропоновано механізм температурного керування характером міжшарового обміну в магнітних багатошарових наноструктурах з температурно-залежною обмінною взаємодією із прямого обміну феромагнітного типу в непрямий обмін антиферомагнітного типу. Магнітне перемикання в таких структурах здійснюється за відсутності прикладеного магнітного поля, на відміну від Кюрі-перемикачів.
5. Вперше розроблені і створені магнітні багатошарові наноструктури на основі шарів розбавлених феромагнітних сплавів та немагнітних прошарків $(\text{Fe-Cr})/\text{Cr}$ з міжшаровою обмінною взаємодією антиферомагнітного типу, константа взаємодії якої може підстроюватись в широких межах в залежності від концентрації магнітної компоненти в шарах розбавленого сплаву (Fe-Cr) та їх товщини. Виявлено вплив концентрації атомів заліза на інтерфейсі $(\text{Fe-Cr})/\text{Cr}$ на міжшарову обмінну взаємодію.
6. Запропоновані, реалізовані і досліджені спінtronні пристрої на основі проведених розробок такі як теромагнітний Кюрі-перемикач, температурно-чутливий магнітний тунельний контакт, як прототип елементу магнітної пам'яті, з теромагнітним перемиканням магнітних та резистивних станів, підхід до локальної температурної стабілізації мікророзмірних елементів електроніки із застосуванням магнітних багатошарових наноструктур з гіантським магнітокалоричним ефектом.

Наукове та практичне значення отриманих результатів і рекомендації щодо їх використання. Тема дисертації крім актуальності та новизни має наукове та практичне значення. Роботи, що увійшли до дисертації виконані на світовому рівні, частина з яких є результатом використання міжнародної наукової співпраці. В результаті вивчення магнітних властивостей багатошарових наноструктур з температурно-керованим міжшаровим обміном були розроблені практичні рекомендації та створені спінtronні пристрой з температурно-керованими функціональними елементами. Одержані в роботі наукові і практичні результати можуть бути використані в наукових дослідженнях, які проводять Інститут фізики НАН України, Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України, Донецький фізико-технічний інститут ім. О.О. Галкіна НАН України, Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б.І. Вєркіна НАН України, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна, Національний технічний університету «Харківський політехнічний інститут» та в інших наукових та науково-педагогічних закладах Національної академії наук України і Міністерства освіти і науки України, які здійснюють дослідження магнітних явищ складних гетеросистем різної розмірності.

Достовірність результатів та ступінь обґрунтованості наукових положень. Достовірність отриманих в роботі результатів забезпечується використанням широкого спектру експериментальних методів та успішним порівнянням отриманих експериментальних результатів з теоретичними розрахунками, виконаними дисертантом в рамках відповідних модельних уявлень. Достовірність і науковий рівень робіт підтверджується їх численним цитуванням авторами з провідних наукових центрів світу. Слід відмітити, що здобувач має більше 1100 цитувань робіт, опублікованих за його участю, його Хірш-індекс дорівнює $h = 20$, а його ім'я добре відоме серед багатьох українських і закордонних спеціалістів, що працюють у області магнетизму та спінtronіки.

Сукупність отриманих в дисертації нових наукових результатів вирішує актуальну наукову задачу з'ясування закономірностей еволюції магнітних властивостей магнітних багатошарових наноструктур з температурно-керованим міжшаровим обміном різного типу в залежності від їх складу, температури та геометрії експерименту.

До дисертаційної роботи є ряд питань і зауважень.

1. В дисертації і авторефераті не зовсім чітко прописаний фізичний механізм виникнення ефекту підмагнічування на інтерфейсі між сильним феромагнетиком і слабким розбавленим феромагнетиком, який має назву *magnetic proximity effect*.
2. В Розділі 1 приведені результати дослідження магнітних властивостей плівок розбавлених феромагнітних сплавів Ni_xCu_{100-x} , отриманих різними методами, а саме методом магнетронного розорошування та електронно-променевого випаровування, проте ці результати не порівнюються. Здобувачу слід було б зазначити, чим ці плівки відрізняються і чому в дисертації вибір зупинився саме на методі магнетронного розорошування для виготовлення таких плівок.
3. В дисертації для дослідження температурно-залежного міжшарового обміну було обрано модифікований спіновий вентиль – Кюрі-перемикач. Проте не зовсім чітко прописане обґрунтування такого вибору. Чи є альтернативні багатошарові наноструктури для дослідження такого ефекту?
4. В Розділі 5 мова йдеється про динамічний обмін між шарами феромагнетика та антиферомагнетика через прошарок немагнітного металу через ефект спінової накачки і про його можливе практичне використання. Проте не говориться, де саме це може бути використано.
5. В тексті дисертації і автореферату зустрічається незначна кількість помилок і неправильних переносів, які, проте, не впливають на трактування речень.

Зроблені зауваження не ставлять під сумнів наукову новизну та достовірність основних результатів і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Загальний висновок. Дисертаційна робота А.Ф. Кравця є завершеною кваліфікаційною науковою працею, яка виконана на високому науковому рівні. Автором отримано нові науково обґрунтовані результати в області магнетизму, що розв'язують важливу наукову проблему з розробки нових принципів ефективного управління магнітним станом складних багатошарових наноструктур з перспективою їх подальшого застосування в області спінироніки.

За актуальністю теми, новизною наукових положень і висновків, достовірністю результатів, обсягом виконаних досліджень, науковим і практичним значенням розглянута дисертаційна робота «Магнітні властивості багатошарових наноструктур з температурно залежною міжшаровою обмінною взаємодією» відповідає вимогам пп. 9, 10, 12 та 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567 (зі змінами) та Наказу МОН України «Про опублікування результатів дисертацій на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук» від 23.09.2019 р. № 1220, а її автор Кравець Анатолій Федорович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за науковою спеціальністю 01.04.11 – магнетизм.

Офіційний опонент:

провідний науковий співробітник відділу фазових перетворень

Донецького фізико-технічного інституту

ім. О.О. Галкіна НАН України,

доктор фізико-математичних наук, професор

О. В. Пащенко

Підпис доктора фіз.-мат. наук Пащенка Олексія Валентиновича засвідчує.

Заступник директора з наукової роботи

Донецького фізико-технічного інституту

ім. О. О. Галкіна НАН України

доктор фізико-математичних наук, професор



В. М. Криворучко