

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Кравця Анатолія Федоровича
**“Магнітні властивості багатошарових наноструктур з температурно
 залежною міжшаровою обмінною взаємодією”**
 представлену на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних
 наук за спеціальністю 01.04.11 – магнетизм.

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

Магнітні багатошарові наноструктури складають основу сучасних спінtronних пристройів різноманітного призначення і наразі інтенсивно досліджуються. Міжшарові обмінні взаємодії різного типу в таких структурах відіграють вирішальну роль в формуванні їх магнітних властивостей. Проте, як правило, ці взаємодії є фіксованими і не можуть бути змінені після виготовлення структур. На практиці ж дуже важливо мати структури, у яких міжшаровий обмін не є фіксований, а ним можна керувати – вмикати чи вимикати шляхом зміни зовнішнього параметра, наприклад, температури, що б стало сприятливим фактором для створення нових спінtronних пристройів на основі термо-магнітного перемикання. Саме на вирішення цієї наукової проблеми і націлена дисертаційна робота Кравця Анатолія Федоровича.

В роботі представлено новий вид міжшарової обмінної взаємодії – температурно-контрольований обмін між шарами сильних феромагнетиків через прошарок слабкого розбавленого феромагнітного сплаву. Магнітний стан прошарку є температурно чутливим в околі привабливих, з точки зору практичного застосування, температур. Це, в свою чергу, робить обмін між шарами сильних феромагнетиків через такий прошарок сильно чутливим до температури.

Таким чином, дисертації вирішує **актуальну** проблему фізики магнетизму, що має як фундаментальне, так і прикладне значення.

Всі роботи, які увійшли до дисертації, виконувались у рамках тематичного плану науково-дослідних робіт Інституту магнетизму НАН України та МОН України (всього 8 робіт). В більшості цих науково-дослідних робіт, перерахованих в авторефераті, здобувач виконував обов'язки керівника. Основні результати дисертації лягли в основу наукових звітів за цими темами.

Метою дисертаційної роботи є 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.

Для досягнення мети роботи дисертантом були успішно вирішені завдання: власноруч виготовлені магнітні багатошарові наноструктур з температурно-залежною міжшаровою прямою і непрямою обмінними взаємодіями та багатошарові наноструктур на основі антиферомагнетиків з динамічною обмінною взаємодією; розроблені фізичні основи температурного керування магнітними станами розроблених багатошарових наноструктур; дослідений вплив температурно-залежних міжшарових обмінних взаємодій в розроблених багатошарових наноструктурах на їх статичні і динамічні магнітні властивості; проведені феноменологічні модельні розрахунки для аналізу отриманих експериментальних даних і встановлення основних фізичних закономірностей поведінки магнітних властивостей багатошарових наноструктур; розроблені спінtronні пристрої, побудовані на основі досліджених багатошарових наноструктур з температурно індукованим перемиканням магнітних станів.

Для дослідження температурно залежного міжшарового обміну дисертантом був выбраний модифікований спіновий вентиль (авторський термін – Кюрі-перемикач), в якому два шари сильних феромагнетиків (один – закріплений із однонаправленою магнітною анізотропією, а інший – вільний із одновісною магнітною анізотропією) розділені прошарком розбавленого феромагнітного сплаву Ni_xCu_{100-x} . Шляхом зміни складу і товщини прошарку регулювалась температурна чутливість та сила міжшарового обміну. Вибір саме такої структури дозволив дослідити польові, температурні, анізотропні магнітні статичні і динамічні властивості багатошарових наноструктур, що важливо для практичного застосування таких структур. Крім того, Кюрі-перемикач сам по собі є новим спінtronним пристроєм – термомагнітним спіновим вентилем. Розбавлений феромагнітний сплав Ni_xCu_{100-x} є майже чи не єдиним сплавом, який характеризується необмеженою взаємною розчинністю магнітної і немагнітної компонент, що дозволяє отримати плівки з температурою Кюрі в широкому діапазоні. В подальшому прямий температурно залежний обмін феромагнітного типу був розширений на багатошарові структури, в яких конкурують і проявляються, в залежності від температури, прямий і непрямий міжшарові обміни, які є відповідальними або за феромагнітний, або за антиферомагнітний обміни в структурі. Розглянуті багатошарові наноструктури в яких в умовах магнітного збудження одного із

шарів реалізується динамічний міжшаровий обмін, опосередкований ефектом спінової накачки. Наочанок, на основі отриманих результатів, були запропоновані і експериментально реалізовані спінtronні пристрої, в яких реалізований ефект температурно залежного міжшарового обміну. Таким чином, всі розділи дисертації є логічно зв'язаними і в сукупності висвітлюють головне завдання дисертації.

Дисертація підготовлена у вигляді **наукової доповіді** за сукупністю публікацій. До основної частини дисертації включено 24 статті у фахових наукових журналах, які згруповані в 6 розділів. 15 статей опубліковані у журналах, віднесені до першого і другого квартилів, відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports. Загальний обсяг дисертації – 280 сторінок, з яких основна частина складає 243 сторінки. Особистий внесок здобувача в отримання результатів чітко окреслений у вступі.

В розділах дисертації послідовно висвітлені питання, що стосуються міжшарового температурно залежного обміну в багатошарових наноструктурах. У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації та визначено мету і задачі дослідження. У **першому розділі** приведені результати дослідження магнітних властивостей плівок розбавлених феромагнітних сплавів Ni_xCu_{100-x} , як температурно чутливих прошарків, що регулюють обмін в багатошарових наноструктурах з температурно чутливим обміном. **Другий розділ** присвячений магнітним статичним, а третій розділ магнітним динамічним дослідженням багатошарових наноструктур з температурно залежним міжшаровим обміном. В **четвертому розділі** температурно залежний обмін розширеній на багатошарові наноструктури, в яких конкурують і проявляються в залежності від температури прямий (феромагнітного типу), чи непрямий (антиферомагнітного типу) обміни. **П'ятий розділ** присвячений динамічному обміну в багатошарових наноструктурах, зумовлений ефектом спінової накачки при феромагнітному резонансу в одному із шарів структури. В **шостому розділі** описано спінtronні пристрої, побудовані на основі досліджених багатошарових наноструктур з температурно залежним міжшаровим обміном. В **висновках** відображені найбільш вагомі нові результати роботи.

В роботі отримано ряд вагомих **нових наукових результатів**:

- 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;

- запропоновано та реалізовано модифікований спіновий вентиль з прошарком розбавленого феромагнітного сплаву як температурно-чутливий спінtronний пристрій – теромагнітний Кюрі-перемикач;
- виявлено, що в обмінній взаємодії між шарами сильних феромагнетиків через прошарок розбавленого слабкого 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;
- встановлено, що в плівках розбавлених феромагнітних сплавів, осаджених методами магнетронного напорошування і електронно-променевого осаджування, спостерігається магнітне композиційне розшарування, спричинене магнітоіндуктованим ефектом в процесі осаджування плівок;
- з метою послаблення ефекту підмагнічування на інтерфейсі між сильним і слабким феромагнетиками та покращення чіткості теромагнітного перемикання в Кюрі-перемикачі синтезовано прошарок розбавленого феромагнітного сплаву з градієнтним розподілом концентрації магнітної компоненти по товщині прошарку;
- запропоновано та створено температурно чутливий магнітний тунельний контакт, як прототип елементу магнітної пам'яті з теромагнітним перемиканням магнітних і резистивних станів;
- 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;
- виявлено кероване температурою анізотропне затухання магнітних динамічних процесів в теромагнітному перемикачі;
- запропоновано механізм та експериментально досліджено гіантський магнітокалоричний ефект, зумовлений непрямим обміном в магнітних багатошарових структурах з прошарками розбавлених феромагнітних сплавів в парамагнітному стані;
- запропоновано методику дослідження магнітних властивостей прошарку слабкого (розбавленого) феромагнетика на підставі обмінної взаємодії з шарами сильних феромагнетиків.

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 спінtronних пристроях.

Результати роботи є **обґрунтованими та достовірними**, що забезпечується використанням широкого спектру експериментальних методів та успішним порівняння отриманих експериментальних результатів з теоретичними розрахунками, виконаними дисертантом в рамках відповідних модельних уявлень. Основні результати роботи опубліковані в провідних міжнародних наукових журналах з високим імпакт-фактором і з прискіпливим рецензування, добре цитуються, а також пройшли апробацію на наукових форумах найвищого рівня.

Автореферат відображає основні результати дисертації та положення, що виносяться на захист. Його структурна побудова і зміст ідентичні основним положенням дисертації.

До дисертаційної роботи є ряд **питань і зауважень**:

1. 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 між магнітною гранулою і немагнітною матрицею призводить до появи обмінної взаємодії між магнітними моментами найближчих магнітних гранул. Ця феноменологічна модель міжгранульної взаємодії в подальшому була розширенна для пояснення обмінної міжшарової взаємодії в Кюрі-перемикачах, але не вказано відмінності прояву цієї взаємодії в багатошарових наноструктурах, оскільки наногранульовані і багатошарові матеріали відрізняють за структурою.
2. В підрозділі 3.2 стверджується, що через ефект близькості на інтерфейсах між сильним і слабким феромагнетиком в Кюрі-перемикачі, ефективна температура слабкого феромагнетика сильно відрізняється, порівняно із випадком, коли він є вільним, проте не уточнюється на скільки саме.
3. Не зовсім чітко пояснюється фізичний механізм ефекту близькості в Кюрі-перемикачах.
4. В підрозділі 3.3. показано сильну кутову і температурну залежність резонансних полів і параметрів затухання феромагнітного резонансу в Кюрі перемикачах з прошарками розбавленого феромагнетика різного складу і товщини. Проте бажано б було виділити, яким чином передається взаємодія між шарами сильних феромагнетиків через прошарок слабкого феромагнетика у випадку феромагнітного резонансу в одному із них.
5. Тексти дисертації і автореферату не позбавлені граматичних помилок і неправильних переносів. Їх кількість незначна, що не впливає суть речень.

Зазначені зауваження не ставлять під сумнів наукову новизну та достовірність основних результатів і загального позитивного враження від дисертаційної роботи. Робота А. Ф. Кравця відповідає вимогам, які висуваються до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора наук згідно “Порядку присудження наукових ступенів”, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 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.

Враховуючи викладене, вважаю, що дисертаційна робота Кравця Анатолія Федоровича “Магнітні властивості багатошарових наноструктур з температурно залежною міжшаровою обмінною взаємодією” є цілісним, завершеним науковим дослідженням, у якому вирішено актуальну наукову проблему сучасної фізики магнітних явищ; за новизною, науковим та практичним значенням, і достовірністю результатів робота відповідає чинним вимогам до докторських дисертацій, а її автор заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.11 – магнетизм.

Офіційний опонент

доктор фізико-математичних наук, професор
головний науковий співробітник
Інституту металофізики
ім. Г. В. Курдюмова НАН України



M. O. Васильєв

Підпис д. ф.-м. н., професора Васильєва Михайла Олексійовича засвідчує:

Вчений секретар

Інституту металофізики

ім. Г. В. Курдюмова НАН України
кандидат фізико-математичних наук



M. I. Савчук