

ВІДГУК
офіційного опонента на дисертаційну роботу
Боринського Владислава Юрійовича

на тему «Магнітні та резонансні властивості багатошарових наноструктур з антиферомагнітними компонентами»,
представлену на здобуття ступеня доктора філософії
в галузі знань 10 Природничі науки
за спеціальністю 105 Прикладна фізика та наноматеріали

Актуальність теми дисертації.

Дисертаційне дослідження В.Ю. Боринського присвячено вивченню магнітно-статичних та магнітно-динамічних характеристик нанорозмірних гетерогенних структур з природними та/або синтетичними антиферомагнітними (АФМ) компонентами в залежності від хімічного складу шарів, конфігурації та геометрії композиції, температури тощо. Подібні гетерогенні структури вже знайшли широке застосування у сучасних високих технологіях спінтроники та наноелектроніки – комірках пам'яті, емітерах та детекторах електромагнітного випромінювання тощо. Більше того, досягнення вищих функціональних характеристик приладів на їх основі вимагає отримання можливості контрольованого впливу на магнітні властивості цих структур, які, зокрема, залежать від факторів, вплив яких досліджується у роботі. Тому, враховуючи бурхливий світовий розвиток наноприладобудування, висока **актуальність** даної дисертаційної роботи є **очевидною**.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їхньої достовірності та новизни.

Наукова новизна результатів, отриманих в дисертації В.Ю. Боринського, полягає в наступному:

1. вперше показано, що створення композитних прошарків Cr/FeCr/Cr, на протипагу класичним суцільним прошаркам FeCr, дозволяє звужити температурний інтервал перемикання магнітної структури до відносно вузького температурного інтервалу (15 К) у порівнянні з випадком однорідного прошарку (≥ 100 К), що пов'язано з пригніченням каналів прямої обмінної взаємодії на феромагнітних (ФМ) межах поділу.

2. виявлено існування додаткового каналу розсіяння спінового струму на межі поділу ФМ-АФМ, спричиненого відхиленням спінів від однорідного

антиферромагнітного порядку внаслідок конкуренції між ефектом близькості ферромагнетика та антиферромагнітним обміном всередині АФМ.

3. вперше продемонстровано можливість багатократного ізотропного підсилення частоти резонансу ФМ шару внаслідок формування «обертової анізотропії» у сусідньому тонкому АФМ шарі (<5 нм).

4. встановлено, що порушення симетрії відносно магнітостатичної дипольної взаємодії у нано-САФ куполовидної форми призводить до розщеплення граничної спін-хвильової моди на коливання акустичного та оптичного типів, гібридизовані між двома шарами нанoeлементів САФ.

5. продемонстровано можливість безпосереднього контролю над розщепленням граничної моди за допомогою термомагнітного фазового переходу прошарку NiCu, перетворюючи нано-САФ у квазі-одношарові елементи.

6. зроблено висновок, що специфічний просторовий профіль коливань виродженого гібридизованого резонансу, притаманного нанoeлементам САФ зменшеного розміру (<100 нм), спричинює підсилення анізотропної поведінки відповідної моди на спектрах.

Всі без виключення положення наукової новизни сформульовано на основі експериментальних досліджень, проведених з використанням сучасних високороздільних методів, або мікромагнітного моделювання за допомогою визнаних програмних комплексів, є **повною мірою обґрунтованими та достовірними**. Достовірність результатів, представлених у дисертаційному дослідженні, також підтверджується тим фактом, що їх опубліковано у 5 статтях у журналах, що індексуються міжнародними наукометричними базами даних Scopus та/або Web of Science, з них 3 статті – у журналах, віднесених до квартилю Q1 відповідно до Scimago Journal & Country Rank.

Мету дисертаційного дослідження – з'ясування особливостей та встановлення закономірностей зміни статичних та динамічних властивостей природних антиферромагнітних матеріалів, синтетичних матеріалів та багатшарових наноструктур, що містять такі компоненти, в залежності від їх будови, магнітних параметрів та магнітного оточення окремих шарів, і геометрії всієї системи, а також знаходження механізмів керування їх резонансною та спін-хвильовою поведінкою для надання нових функціональних можливостей пристроям, розробленим на основі таких

гетероструктур – досягнуто повною мірою шляхом вирішення задач дослідження, поставлених за результатами критичного аналізу сучасної наукової літератури, оприлюдненої у престижних рецензованих журналах.

Дотримання принципів академічної доброчесності.

Аналіз представленої звітності подібності дисертації В.Ю. Боринського на текстові співпадиння (0,68%) дозволяє зробити висновок, що дана робота **не містить ознак порушення принципів академічної доброчесності** – плагіату чи фальсифікацій. Авторський внесок у роботи, опубліковані у співавторстві, а також відмінність результатів, наведених у даній дисертаційній роботі та у дисертації А.Ф. Кравця, результати якої також висвітлені у статті DOI 10.1186/s11671-018-2669-0, чітко охарактеризовано на стор. 24-25 дисертації, що дозволяє стверджувати, що дисертація В.Ю. Боринського є окремою, самостійно виконаною науковою працею.

Мова та стиль викладення результатів.

Дисертаційна робота викладена українською мовою з дотриманням наукового стилю. Подекуди трапляються граматичні помилки, але їх кількість є незначною, що не псує загальне позитивне враження від роботи. *В якості зауваження слід зазначити некоректне, на думку опонента, вживання англійських термінів, відповідники яких наявні в українській мові – наприклад, «спейсер» замість «прошарок», «інтерфейс» замість «межа поділу» тощо.* Також в оформленні роботи спостерігаються незначні відхилення від вимог ДСТУ 3008-95 «Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлення» – зокрема, інколи порушується вимога п. 7.5.1 даного стандарту: *«рисунки слід розміщувати у звіті безпосередньо після тексту, де вони згадуються вперше, або на наступній сторінці», що певною мірою ускладнює роботу з дисертацією.* В цілому, представлений матеріал викладено послідовно та логічно.

Структура дисертації.

Дисертація складається з анотації, викладеної державною та англійською мовами, вступу, 5 розділів, висновків, списку використаної літератури та додатку А, в якому наведено інформацію щодо наукових праць, в яких

опубліковано основні результати дослідження. Загальний обсяг дисертаційної роботи складає 167 сторінок.

У **вступі** обґрунтовано актуальність дисертаційного дослідження, сформульовано його мету та задачі, вирішення яких забезпечать її досягнення. Окреслено зв'язок роботи з науково-дослідними темами, що виконувалися у відділі фізики плівок Інституту магнетизму НАН України та МОН України (№№0119U100469, 0120U100457, 0121U109049, 0122U001885, 0121U111807). Охарактеризовано об'єкт та предмет дослідження, а також надано стислу інформацію щодо використаних експериментальних та обчислювальних методів дослідження. Сформульовано положення наукової новизни та висвітлено практичне значення отриманих в дисертації результатів. Надано інформацію щодо особистого внеску здобувача, апробацію результатів на міжнародних конференціях та їх публікацію у наукових статтях.

У **другому розділі** представлено результати критичного огляду літературних джерел, який дозволив обґрунтувати актуальність даної дисертації, сформулювати її мету та задачі. Зокрема, окреслено історичну ретроспективу створення та використання природних та синтетичних антиферомагнітних матеріалів. Надано інформацію щодо фізичної природи непрямой обмінної взаємодії. Відзначено перспективи прикладного застосування даного класу нанорозмірних матеріалів у майбутньому.

У **третьому розділі** описано методику отримання нанорозмірних гетерогенних структур з шарами природних та синтетичних антиферомагнітних матеріалів методом магнетронного напорошення, а також їх магнітної характеристики за допомогою експериментальних (феромагнітний резонанс) та обчислювальних (мікромагнітне моделювання) методів.

У **четвертому розділі** представлено результати дослідження магнітних характеристик нанорозмірних синтетичних антиферомагнетиків з феромагнітними шарами Fe та пермалою.

У *підрозділі 4.1* представлено результати дослідження температурного перемикання намагніченості у синтетичних антиферомагнетиках на основі тонких шарів Fe і показано, що створення композитних прошарків Cr/FeCr/Cr, на противагу класичним суцільним прошаркам FeCr, дозволяє звузити температурний інтервал перемикання магнітної структури, що пов'язано з пригніченням каналів прямої обмінної взаємодії на феромагнітних межах

поділу і має позитивне значення для можливості прикладного використання даних гетероструктур в якості сенсорних елементів.

У *підрозділі 4.2* продемонстровано можливість температурного контролю трансформації між антипаралельною та паралельною конфігураціями магнітних моментів за рахунок переходу від домінуючої дипольної магнітно-статичної взаємодії до домінуючої обмінної феромагнітної взаємодії між шарами пермалою, відокремлених прошарком слабоферомагнітного сплаву NiCu, у масивах нанодисків синтетичних антиферомагнетиків, що відкриває перспективи їх використання в якості функціональних елементів магнітної логіки.

У **п'ятому розділі** наведено результати магнітної характеристики гетерогенних структур, що містять шари природних антиферомагнітних та феромагнітних матеріалів.

У *підрозділі 5.1* досліджено зміни резонансного поля та ширини резонансної лінії плівкових структур $\text{Py}/\text{FeMn}/\text{Cu}/\text{Py}$ в залежності від температури та товщини антиферомагнітного прошарку FeMn і показано специфічний характер взаємодії струму спінової накачки з шарами Py/FeMn , зокрема, показано, що внесок до параметра затухання Гільберта, обумовлений спіновою накачкою, розбивається на дві окремі складові: параметр затухання, зумовлений анізотропним спіновим розсіянням на магнітній ґратці антиферомагнетика, та внесок спінового розсіяння поблизу межі поділу Py/FeMn .

У *підрозділі 5.2* показано можливість прискорення резонансної динаміки феромагнітного шару пермалою, закріпленого тонким антиферомагнітним шаром FeMn, завдяки виникненню специфічної анізотропії за рахунок термічної активації спінів, що, в свою чергу, призводить до необоротного відхилення спінів у полікристалічному FeMn.

У **шостому розділі** наведено результати аналізу спінової динаміки у масивах синтетичних антиферомагнетиків.

У *підрозділі 6.1* досліджено особливості спін-хвильової динаміки синтетичного антиферомагнетика з РККІ зв'язком еліпсоподібної форми за допомогою мікромагнітного моделювання і показана адекватність використаної моделі у порівнянні з наявними експериментальними результатами. Зокрема,

показана специфічна трансформація структури спін-хвильових мод вищих порядків, виявлених у змодельованій структурі.

У *підрозділі 6.2* наведено результати дослідження методом феромагнітного резонансу масиву гетерогенних структур Pu/NiCu/Pu та показано виникнення додаткових резонансних ліній вищих порядків, які пов'язані зі збудженням граничних мод у наноструктурі синтетичних антиферомагнетиків. Проведено порівняння експериментальних даних із результатами мікромагнітного моделювання і продемонстровано, що саме гетерогенна структура з двома шарами Pu/NiCu/Pu різного діаметру обумовлює виявлену в експерименті спін-хвильову поведінку, яка не характерна для окремих шарів Pu . Також показано можливість переходу даної гетерогенної системи до квазіодношарового стану за зниження температури нижче точки Кюрі NiCu , що має виражений вплив на резонансний спектр.

У *підрозділі 6.3* окреслено результати дослідження резонансних характеристик масивів синтетичних антиферомагнетиків Pu/NiCu/Pu еліпсоподібної форми з розмірами, близькими до обмінної довжини. Продемонстровано, що у таких елементах збуджується лише одна мода, однак із суттєво гібридизованим просторовим розподілом коливань.

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.

Наукові результати дисертації висвітлені у **1** монографії та **6** наукових публікаціях у журналах, що індексуються міжнародними наукометричними базами даних Web of Science та Scopus, з них 3 статті – у журналах, віднесених до квартилю Q1 відповідно до Scimago Journal & Country Rank. Автор також зазначає, що результати дисертаційного дослідження висвітлено у матеріалах міжнародної конференції 2022 IEEE 12th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties. Дана публікація індексується базою Scopus та має DOI, але видання не є періодичним, тому, на мою думку, не може бути зарахованим. У той самий час, і без даної публікації вимоги щодо висвітлення результатів дисертацій на отримання ступеня доктора філософії виконуються повною мірою. Також результати дисертації апробовано на **10** наукових міжнародних конференціях. У дисертації В.Ю. Боринського **не виявлено елементів плагіату чи фальсифікації**, а подібність тексту з відкритими джерелами є мінімальною. Всі основні наукові результати, на

підставі яких сформульовано пункти наукової новизни дисертаційного дослідження, повністю відображено в публікаціях здобувача.

До дисертації, на думку опонента, варто зробити наступні зауваження та рекомендації:

- 1) на стор. 54 дисертації зазначено: «Нижній Та(5) слугував в якості буферного шару для кращого узгодження параметрів ґраток термічно окисленої підкладки Si/SiO₂ та Ру, зменшуючи рівень напружень та збільшуючи стійкість напорошених матеріалів». Шар SiO₂, як правило, формується аморфним – щодо якої в такому випадку узгодженості параметрів ґраток йде мова?
- 2) в методичному розділі надано детальний опис методу феромагнітного резонансу і мікромагнітного моделювання, в той час як методика визначення польових залежностей намагніченості наведена лише поверхнево – чому?
- 3) якщо автор з метою виявлення різниці у намагніченості між верхнім та нижнім шарами пермалою у тришарових синтетичних антиферомагнетиках Ру/NiCu/Ру досліджував контрольні тонкі шари пермалою, розміщені під та над шаром Сu, то постає питання, чому ці контрольні зразки містили саме шар Сu, а не сплаву NiCu?
- 4) яким би очікувався результат дослідження не масивів синтетичних антиферомагнетиків Ру/NiCu/Ру, а відповідних суцільних тришарових плівок? Можливо саме таке дослідження дозволило б підтвердити припущення щодо впливу куполоподібності структури на її намагніченість?
- 5) технічне зауваження – розділ «Вступ» не варто було включати до загальної нумерації, відповідно першим розділом мав би бути огляд літературних джерел.

Зроблені зауваження мають **рекомендаційний характер і ніяк не знижують загальну високу оцінку дисертаційної роботи В.Ю. Боринського.**

Висновок про дисертаційну роботу.

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Боринського Владислава Юрійовича на тему «Магнітні та резонансні властивості багатошарових наноструктур з антиферомагнітними компонентами» виконана на високому науковому рівні, не має ознак порушення принципів академічної доброчесності, є завершеним самостійно виконаним

науковим дослідженням, результати якого мають істотне значення для розвитку уявлень щодо фізики нанорозмірних гетерогенних систем, перспективних для застосувань у сучасних високих технологіях наноелектроніки та спінтроніки.

Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені пунктами 6–9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувач Владислав Юрійович Боринський **заслуговує на присудження ступеня доктора філософії** в галузі знань «10 Природничі науки» за спеціальністю «105 Прикладна фізика та наноматеріали».

Офіційний опонент:

Директор навчально-наукового інституту матеріалознавства та зварювання імені Є.О. Патона КПІ ім. Ігоря Сікорського, доктор фізико-математичних наук, старший дослідник



Ігор ВЛАДИМИРСЬКИЙ

«20» листопада 2023 року

Підпис

І.А. Владимирського засвідчую

Учений секретар
КПІ ім. Ігоря Сікорського,
кандидат технічних наук, доцент



Валерія ХОЛЯВКО