

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

на дисертаційну роботу

Боринського Владислава Юрійовича

«Магнітні та резонансні властивості багатошарових наноструктур
з антиферомагнітними компонентами»,

подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії
за спеціальністю 105 – Прикладна фізика та наноматеріали

Дисертаційна робота В. Ю. Боринського присвячена дослідженню магнітостатичних та резонансних властивостей синтетичних антиферомагнетиків (САФ), а також структур із шарами природних антиферомагнетиків (АФМ), при зменшенні лінійних розмірів їх інтегральних компонент до величин порядку обмінної довжини феромагнітних матеріалів.

Актуальність проблематики дисертаційної роботи визначається необхідністю розробки та створення високоякісних швидкодіючих пристроїв антиферомагнітної (АФМ) спінтроніки, а саме комірок пам'яті на базі спінових клапанів, магнітних тунельних контактів, спінтронних осциляторів і детекторів, логічних магнонних елементів тощо, в яких АФМ матеріали є ключовими функціональними складовими. На даний момент практична реалізація таких систем на основі природних АФМ є доволі ускладненою, що робить відповідні дослідження для наноструктур з САФ та комбінованими структурами антиферомагнетик-феромагнетик актуальними та перспективними. Зокрема, серйозним викликом в сучасній науці є забезпечення контрольованих і відтворюваних магнітних характеристик спінтронних пристроїв, що є принциповою передумовою для знаходження енергоєфективних способів обробки та збереження в них інформації, а отже свідчить про потребу систематичного вивчення поведінки АФМ шарів у таких наноструктурах. Окремим важливим питанням є пришвидшення магнітної динаміки у двошарових системах феромагнетик-антиферомагнетик, які зазвичай використовуються для наведення спінової поляризації у магнітних пристроях і обмежуються лише традиційним явищем обмінного зміщення. Крім того, САФ можуть бути практично привабливі, оскільки, використовуючи гнучкий контроль їх магнітного стану, можна проводити модифікацію дисперсії спінових хвиль у магнонних кристалах, керувати динамічними режимами роботи спінтронних пристроїв, обирати певні з них тощо. З огляду на все це, вважаю, що проведені здобувачем дослідження є цілком **актуальними**.

Актуальність проведених досліджень також підтверджується тим, що наукові результати, наведені в дисертації, отримані в рамках 5 держбюджетних науково-дослідних робіт і проектів НАН України та МОН України.

Загальна характеристика дисертаційної роботи

Мета роботи полягає у вивченні особливостей статичних і динамічних властивостей природних і синтетичних антиферромагнетиків, а також багат шарових наноструктур на їх основі залежно від магнітних та геометричних параметрів їх шарів, а також у знаходженні механізмів керування резонансною та спін-хвильовою поведінкою зазначених наноструктур і пристроїв для надання ним нових функціональних можливостей. Сформульована мета відповідає поставленим та виконаним у дисертаційній роботі завданням.

Дисертація В.Ю. Боринського є **завершеною науковою працею**, яка складається з анотації, шести розділів (включно зі вступом), висновків, списку використаних джерел та додатку.

Текст дисертації викладено на 167 сторінках, з яких оригінальні розділи 3-6 займають 101 сторінку. Робота містить 37 рисунків та 1 додаток, що розміщується на 3 сторінках. Список використаних джерел налічує 267 посилань і займає 16 сторінок. Варто зауважити, що кількість посилань у роботі є дещо більшою, ніж у типових дисертаціях докторів філософії, однак у тексті ці посилання наводяться доречно і загалом не порушують вимог щодо загального обсягу дисертації.

Матеріал дисертаційного дослідження подано логічно та послідовно, робота стилістично правильно побудована та оформлена згідно з вимогами наказу №40 Міністерства освіти і науки України «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» від 12 січня 2017 року.

Анотація відображає основний зміст дисертації та достатньо повно розкриває отримані здобувачем наукові результати.

У **вступі** (першому розділі дисертації) обґрунтовується обрана тема дисертаційного дослідження, наводяться мета та задачі дослідження, визначаються об'єкт і предмет дослідження. Також викладаються наукова новизна одержаних результатів та їх практична цінність. Достатньо детально зазначається персональний внесок здобувача В.Ю. Боринського до публікацій, що виносяться на захист.

Другий розділ роботи містить короткий ретроспективний огляд досліджень за тематикою дисертаційної роботи. Надається опис досліджень, пов'язаних із САФ матеріалами, фізичне пояснення та аналітичний формалізм явища непрямої

міжшарової РККІ взаємодії у гетероструктурах. Наприкінці розділу автор обговорює низку прикладних застосувань, для яких перспективним є використання наноструктур з АФМ шарами.

Представлення оригінальних результатів починається з *третього* розділу, в якому автор спершу надає опис експериментальних методів, які він використовував під час виконання дисертаційного дослідження. Проводиться огляд методу магнетронного напорошення тонкоплівкових багатшарових структур та представляються фізичні засади спектроскопії феромагнітного резонансу, де також переконливо обґрунтовується доцільність вибору цього методу для аналізу магнітних властивостей об'єктів, що досліджуються. Обговорюється загальна ідея методу мікромагнітного моделювання як інструмента для доповнення та теоретичної інтерпретації експериментальних даних. Наводиться технічна інформація про атомарний склад та геометричні параметри виготовлених для дослідження зразків.

Четвертий розділ дисертації включає в себе результати досліджень процесів перемагнічування, гістерезисної поведінки САФ матеріалів на базі структур типу «феромагнетик / парамагнетик / феромагнетик». Також в цьому розділі аналізується вплив геометричних і магнітних параметрів інтегральних компонент структур на характер взаємодій між цими компонентами. Розділ складається з двох логічно пов'язаних між собою частин, в яких послідовно аналізується кероване температурою перемикання між феромагнітним та АФМ станами спочатку для тонкоплівкових гетероструктур Fe/S_{1,2}/Fe з композитними прошарками S_N = [Cr/FeCr/Cr]_N, а потім – для періодичних масивів круглих нанодисків Py/NiCu/Py. Це дозволяє окреслити спільні й відмінні риси між двовимірними суцільними САФ матеріалами та їх нанорозмірними латерально обмеженими аналогами.

Так, у першому класі структур визначальним механізмом для перемикання САФ між рівноважними станами є конкуренція непрямой обмінної РККІ взаємодії феромагнітного та антиферомагнітного типів, яка регулюється термомагнітним фазовим переходом прошарків сплаву FeCr. Безпосередньо автором проведено числові розрахунки в рамках термодинамічної моделі і відтворено температурні зміни гістерезису та ефективного поля міжшарової взаємодії у тонкоплівкових САФ. Одержані результати дозволяють автору обґрунтовано стверджувати, що використання тонких шарів Cr у композитних прошарках робить інтервал температурного перемикання досить вузьким (~ 15 K), а наявність каналу непрямой РККІ взаємодії ефективно усереднює вплив магнітокристалічної анізотропії шарів Fe на коерцитивну силу всієї системи.

Для структур другого класу демонструється можливість реалізації АФМ стану виключно за рахунок магніtodипольної взаємодії між феромагнітними шарами. Аналізуються фізичні причини суттєвої трансформації форми петлі гістерезису залежно від зміни температури. Демонструється домінуюча роль магнітокристалічної анізотропії прошарку NiCu для нанодисків, коли вони перебувають в однодоменному феромагнітному стані.

П'ятий розділ роботи присвячено дослідженню магнітного стану двошарових плівок Ru/FeMn, в яких товщина АФМ шару FeMn є співрозмірною або меншою за характерну обмінну довжину Ru. Як зазначає автор роботи, особливістю таких систем є те, що в широкому діапазоні температур шар FeMn перебуватиме на межі між магнітно-впорядкованим та парамагнітним станом – умов, які раніше детально не вивчались в обмінно-закріплених системах Ru/FeMn.

У першій частині розділу, шляхом вимірювань параметру релаксації коливань намагніченості вільного шару Ru структури Ru/FeMn/Cu/Ru, вивчаються процеси спінового транспорту в двошаровій системі Ru/FeMn. Виявлено існування додаткового каналу поглинання спінового струму, який пов'язується з формуванням неоднорідного відхилення спінів на межі розділу феромагнітного та антиферомагнітного середовищ внаслідок конкуренції між відповідними їх типами обміну. Інтерпретація автора підтверджується суттєвим анізотропним уширенням резонансної лінії вільного Ru, спостереженим для структур, в яких товщина шару FeMn становить 3 нм, і його повною відсутністю у зразку з товщиною шару FeMn 7 нм, де спіновий струм вже не досягає границі розділу середовищ.

У другій частині розділу автором показано, що нетривіальна спінова конфігурація двошарової системи має практичну привабливість – виникнення спроможної до переналаштування «обертової» анізотропії та пов'язаного з нею пришвидшення резонансної динаміки до частот майже на порядок більших від частоти феромагнітного резонансу звичайної плівки Ru. При цьому пришвидшення магнітної динаміки є ізотропним, що є перевагою порівняно з альтернативним механізмом обмінного зміщення, де збільшення частоти обмежується напрямком осі обмінної анізотропії антиферомагнетика, зафіксованої під час виготовлення структур.

Шостий розділ дисертації автор присвячує вивченню специфіки спін-хвильового резонансу нанорозмірних елементів САФ. Розділ складається з трьох частин. У першій проводиться перевірка застосовності мікромагнітної моделі для відтворення спектрів та аналізу стоячих спінових хвиль у нанорозмірних

САФ. Друга та третя частини присвячені експериментальному дослідженню спін-хвильового резонансу масивів САФ $\text{Py}/\text{NiCu}/\text{Py}$ з різною періодичністю та латеральними розмірами наноелементів. Вивчається вплив відхилення геометрії нанодисків від ідеальної круглої форми на симетрію локалізованих областей коливань стоячих спінових хвиль. У рамках мікромагнітної моделі автор показує, яким чином просторовий розподіл прикладеного імпульсу магнітного поля регулює вибіркоче збудження мод вищих порядків. Демонструється як зручний температурний контроль магнітостатичного стану САФ може бути перенесений й на спін-хвильову поведінку, де за кімнатних температур нанодиски мають два магнітні домени і характеризуються розщепленням граничної моди на коливання акустичного та квазіоптичного типів, а нижче точки фазового переходу прошарку вони набувають однодоменого стану з виродженою граничною модою. Наприкінці розділу проводиться аналіз фізичних причин виродження коливань центральної та граничної спін-хвильових мод у нанодисках з розміром $\lesssim 75$ нм.

Після шостого розділу дисертації наведено загальні **висновки**. У них узагальнюються найбільш вагомні наукові результати проведеного дослідження, які повною мірою відповідають поставленій меті та завданням роботи.

В дисертаційній роботі одержано ряд **нових наукових результатів**:

1. Вперше продемонстровано, що використання композитного прошарку $\text{Cr}/\text{FeCr}/\text{Cr}$ з серією повторень тонких шарів Cr між слабо-ферромагнітними шарами FeCr ефективно пригнічує канал прямої обмінної взаємодії та ефект близькості на інтерфейсах, оптимізуючи температурне перемикання стану САФ до відносно вузького температурного інтервалу (~ 15 К) у порівнянні з випадком однорідного прошарку (≥ 100 К).

2. Виявлено існування додаткового каналу розсіяння спінового струму на інтерфейсі ферромагнетик-антиферромагнетик, спричиненого відхиленням спінів від однорідного антиферромагнітного порядку внаслідок конкуренції між ефектом близькості ферромагнетика та антиферромагнітним обміном всередині АФМ шару наноструктури.

3. Вперше продемонстровано можливість суттєвого ізотропного зростання частоти резонансу ферромагнітного шару внаслідок формування т. зв. «обертової» анізотропії у сусідньому тонкому (< 5 нм) АФМ шарі.

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

квазіоптичного типів, гібридизовані між двома шарами нано-САФ.

5. Продемонстровано можливість безпосереднього контролю процесу розщеплення граничної моди за допомогою термомагнітного фазового переходу прошарку NiCu при перетворенні нано-САФ у квазі-одношарові елементи.

6. Встановлено, що специфічний просторовий профіль коливань виродженого гібридизованого резонансу, притаманного нанoeлементам САФ зменшеного розміру (<100 нм), посилює вплив анізотропії на поведінку відповідної моди.

Практична цінність результатів полягає у виявленні нових фізичних ефектів, використовуючи які, можна контролювано змінювати функціональні режими роботи пристроїв спінтроніки та нанoeлектроніки, діючи на систему зовнішнім магнітним полем або змінюючи її температуру. Одержані закономірності розширюють можливості проектування та контрольованого відтворення динамічних характеристик нанорозмірних спінтронних пристроїв у мікрохвильовому та субтерагерцовому діапазонах.

Наукові результати, що входять до дисертаційної роботи, **опубліковані** загалом у 17 наукових працях: 1 монографії, 6 статтях у фахових виданнях, з яких 3 відповідають кватиллю Q1 згідно з даними наукометричних баз SCImago Scientific Journal Rankings (SJR) та Web of Science (WoS), а також 10 тезах доповідей наукових конференцій. В опублікованих працях у повному обсязі висвітлені наукові положення, результати та висновки дисертації.

Достовірність отриманих результатів підтверджується використанням сучасних експериментальних методів досліджень та кваліфікованим аналізом результатів за допомогою загальноприйнятих для галузі магнетизму аналітичних та числових методів.

Дисертаційна робота пройшла перевірку на плагіат у системі Unicheck, за результатами якої у роботі **не виявлено порушень** академічної доброчесності.

До дисертаційної роботи є декілька **зауважень**:

1. У підрозділі 4.1 демонструється кероване температурою перемикання магнітних моментів у структурі Fe/[Cr/FeCr/Cr]₂/Fe з антипаралельної до паралельної (ферромагнітної) конфігурації. Автор відзначає, що моменти шарів Fe за температур вище точки Кюрі прошарків FeCr є вільними, оскільки сумарна товщина спейсера є більшою від критичної відстані РККІ взаємодії. З тексту роботи можна здогадатись, що перехід до паралельної конфігурації досягався шляхом прикладання до зразка зовнішнього магнітного поля, але деталі цього

експерименту варто було б описати.

2. Центральною думкою розділу 4 дисертаційної роботи є знаходження закономірностей зміни магнітного гістерезису та характеру міжшарових взаємодій у структурах САФ при переході від геометрії тонких плівок до латерально обмежених наноструктур. Однак, ефект гістерезису та міжшарова взаємодія у таких структурах суттєво залежать від вибору матеріалів окремих шарів. У першій частині розділу розглядаються плівкові САФ, виготовлені на базі Fe та Cr, а у другій частині – структури з використанням сплавів Ru та NiCu. Однак пояснення або мотивації щодо саме такого вибору матеріалів шарів у роботі не наведено. Доцільно було б також провести безпосереднє порівняння, наприклад, плівкових Ru/NiCu/Ru структур з відповідними нанодисками.

3. У розділі 5, з одного боку, досліджуються процеси релаксації динаміки намагніченості у структурах з двошаровою підсистемою Ru/FeMn, а з іншого – демонструється ізотропне зростання частоти феромагнітного резонансу шару Ru за рахунок формування «оберткової» анізотропії у цій двошаровій структурі. Як відомо, антиферомагнетикам притаманні більші значення коефіцієнта згасання, ніж для феромагнетиків. Тому для більш наочної демонстрації резонансних характеристик двошарової системи Ru/FeMn та практичних переваг використання наведеної «оберткової» анізотропії, доцільно було б провести аналіз резонансних характеристик наноструктури з урахуванням як зміни частоти (пришвидшення магнітної динаміки), так і зміни добротності магнітних коливань (збільшення коефіцієнта згасання для шару Ru).

4. У тексті дисертації часто згадується магнітодипольна взаємодія між шарами нанорозмірних САФ, зокрема, велика увага цьому приділяється у підрозділі 4.2 та розділі 6, де автор наголошує на тому, що ця взаємодія відіграє ключову роль у процесах утворення антиферомагнітного стану нанодисків. Як відомо, магнітодипольна взаємодія за своєю природою тісно пов'язана з явищем розмагнічування і визначається полями розсіяння, які утворюються певним розподілом магнітних моментів феромагнетика. Але з тексту дисертації не зовсім зрозуміло, чи проводились аналітичні розрахунки тензора розмагнічуючих елементів для досліджуваних нанооб'єктів. Як під час проведення мікромагнітного моделювання враховувалась магнітодипольна взаємодія між елементами масивів наноструктур? Чи може ця взаємодія враховувалась лише виключно при розгляді шарів всередині окремих нанодисків?

5. Розділ 6 дисертаційної роботи цілком присвячений особливостям спін-хвильової динаміки нанорозмірних САФ. Структури САФ, у цьому сенсі, являють собою систему з двох зв'язаних магнітних осциляторів, кожен з яких

пов'язаний з окремим феромагнітним шаром нанодиску. Для таких систем, завдяки зв'язку між осциляторами, характерним є зсув частоти коливань системи відносно власних частот феромагнітних шарів. Доцільним було б провести розрахунок коефіцієнту зв'язку та відповідного зсуву частот. Це підвищило б науково-технічну цінність отриманих результатів.

6. Дисертаційне дослідження має суттєву експериментальну складову, а отримані в роботі результати не тільки дають відповідь на ряд конкретних наукових запитань, але й демонструють принципові тенденції, важливі для розвитку антиферомагнітної спінтроніки. Переважно ці результати одержані з використанням вітчизняного, часто не досить нового обладнання, а значить результати дисертаційної роботи, в принципі, можуть бути впроваджені у вітчизняне виробництво з використанням вже існуючої технологічної бази. З огляду на це, практичне значення роботи, наведене в дисертації, виглядає написаним занадто скромно і може бути суттєво розширене.

7. Оформлення дисертації має певні технічні вади:

а) Інформація, наведена на деяких графіках в оригінальній частині роботи, наприклад, рис. 4.1, 4.6, 5.6, повністю не розшифрована у підписі до графіку.

б) Іноді у формулах та поясненнях до них присутні дрібні описки, наприклад, відсутня квадратна дужка в (4.1). В тій же формулі (4.1) наводиться вираз для густини енергії, а в підписі до формули зазначається, що це енергія, а не густина енергії. Величина H , яка входить до (4.1) за розмірністю в системі СІ має бути індукцією поля, а символом H у дисертації позначено напруженість магнітного поля тощо.

в) Дисертація написана сучасною українською мовою, з використанням загально вживаної термінології, але іноді зустрічається сленг, наприклад, «спейсер» замість «прошарок», замість «прискорення» магнітної динаміки краще, мабуть, писати «пришвидшення» динаміки тощо. Також у роботі присутня незначна кількість орфографічних і граматичних помилок.

Приведені зауваження не зменшують цінності одержаних наукових результатів і дисертаційної роботи як завершеної самостійної кваліфікаційної праці дисертанта, та не мають принципового характеру.

Загальний висновок

Враховуючи актуальність теми, наукову новизну та практичну цінність отриманих наукових результатів, оформлення на належному рівні дисертаційної роботи та дотримання стандартів академічної доброчесності, вважаю, що робота

«Магнітні та резонансні властивості багат шарових наноструктур з антиферомагнітними компонентами» цілком задовольняє вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішень разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 44 від 12 січня 2022 року (зі змінами від 21.03.2022 р.), а її автор, **Владислав Юрійович Боринський**, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 10 – Природничі науки за спеціальністю 105 – Прикладна фізика та наноматеріали.

Офіційний опонент

завідувач кафедри нанофізики та наноелектроніки
Навчально-наукового інституту високих технологій
Київського національного університету
імені Тараса Шевченка,
доктор фіз.-мат. наук, професор

О.В. Прокопенко

Підпис О.В. Прокопенка засвідчую:

«Магнітні та резонансні властивості багатошарових наноструктур з антиферромагнітними компонентами» цілком задовольняє вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішень разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 44 від 12 січня 2022 року (зі змінами від 21.03.2022 р.), а її автор, **Владислав Юрійович Боринський**, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 10 – Природничі науки за спеціальністю 105 – Прикладна фізика та наноматеріали.

Офіційний опонент

завідувач кафедри нанофізики та наноелектроніки
Навчально-наукового інституту високих технологій
Київського національного університету
імені Тараса Шевченка,
доктор фіз.-мат. наук, професор



О.В. Прокопенко

Підпис О.В. Прокопенка засвідчую:

