

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Куліша Володимира Вікторовича «*Магнітні спін-хвильові та одноелектронні оптичні властивості наносистем оболонкового типу*», представлена на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.11 – магнетизм

Спін-хвильова тематика активно розробляється науковцями вже не перше десятиріччя. Але, не зважаючи на це, тут все ще залишається певне коло невирішених питань як фундаментального, так і прикладного характеру. Сьогодні фундаментальні дослідження в цій області стимулюються потребами спінової електроніки, зокрема - магноніки, яка тепер переходить на наномасштабний рівень. Дисертаційна робота Куліша В. В. присвячена дослідженню процесів розповсюдження спінових хвиль в феромагнітних і антиферомагнітних середовищах нанорозміру оболонкового типу з порушенням симетрією.

Роботи, що увійшли до дисертації, виконувалися в рамках тематичного плану науково-дослідних робіт кафедри загальної та експериментальної фізики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» МОН України, Інституту магнетизму НАН і МОН України та міжнародного проекту програми «Horizon 2020».

Дисертація складається зі Вступу, семи розділів, Висновків, Списку використаних джерел та 10 Додатків. Повний обсяг дисертації – 433 сторінки. Дисертація містить 38 рисунків; список використаних джерел складає 337 найменувань.

Метою дисертаційної роботи є встановлення закономірностей формування статичних та динамічних властивостей магнітних наносистем оболонкового типу з різноманітним типом геометричної структури. Продемонстровано як сам факт суттєвого впливу форми та структури наносистеми на її магнітні та оптичні характеристики, так і ключові фізичні особливості такого впливу. У випадку низьких частот це зроблено для процесів збудження та поширення спінових хвиль, зокрема збудження та поширення спінових хвиль спін-поляризованим струмом; у випадку високих частот особливості впливу геометричної форми наносистеми продемонстровано на прикладах процесів одноелектронного поглинання світла в металевих наносистемах оболонкового типу.

Наведу приклади найбільш цікавих, на мій погляд, результатів дисертаційної роботи.

1. Для наносистеми з легкоосьового феромагнетика довільного перерізу з одновимірною трансляційною симетрією знайдено закон дисперсії дипольно-обмінні спінові хвиль та показано, що він має одинаковий вигляд у всіх наносистемах такого типу. Для нанотрубок колового та еліптичного перерізів отримані відношення між компонентами хвильового вектору спінової хвилі. Показано, що для тонких трубок такі відношення переходять у спектри значень поперечних хвильових чисел. Для нанотрубки з легкоплощинного феромагнетику досліджено дипольно-обмінні спінові хвилі з урахуванням анізотропії, отримано закон дисперсії та відношення між компонентами хвильового вектору. Проведене порівняння з аналогічними результатами для нанотрубки з легкоосьового феромагнетика. Встановлено, що залежність частоти спінової хвилі від поздовжнього хвильового числа при постійному модулі повного хвильового числа є

спадаючою функцією для легкоосьового феромагнетику та нарastaючою для легкоплощинного.

2. Для нанотрубок з легкоосьового феромагнетика колового та еліптичного перерізів, через які в поперечному напрямку протікає спін-поляризований струм, досліджено вплив такого струму на спін-хвильові властивості. Отримано закон дисперсії для дипольно-обмінних спінових хвиль з урахуванням анізотропії, дисипації та впливу спін-поляризованого струму. Показано суттєвість впливу спін-поляризованого струму на закон дисперсії спінових хвиль у нанотрубках для типових значень їх параметрів та густин струмів.

3. Для металевої нанотрубки еліптичного перерізу показано, що врахування квантування спектру значень хвильових чисел та енергій електрону у нанотрубці призводить до появи осцилюючої залежності компонент поглинання від частоти електромагнітної хвилі, що падає на нанотрубку. Показано, що за низьких частот оптичного діапазону домінуючим є електричне поглинання, а магнітне поглинання стає суттєвим за частот близької інфрачервоної та/або видимої частини оптичного діапазону.

4. Для металевого нанояйця, близького до симетричної сферичної нанооболонки, в рамках одноелектронної моделі отримано компоненти тензора оптичної провідності (електрична компонента поглинання). Встановлено, що квантування енергетичного спектру електронів у оболонці призводить до появи осцилюючої залежності компонент поглинання від частоти електромагнітної хвилі, що падає на нанояйце, а порушення симетрії наночастинки не впливає на характер цієї залежності. Для симетричної сферичної нанооболонки проведено порівняння електричної та магнітної компонент поглинання. Встановлено, що, як і для нанотрубки, за низьких частот оптичного діапазону електричне поглинання є домінуючим. Проте, на відміну від нанотрубки, для нанооболонки за типових значень її параметрів магнітне поглинання стає суттєвим за частот середньої – близької інфрачервоної частини оптичного діапазону.

5. Для симетричної феромагнітної (легкоосьовий феромагнетик) нанооболонки у формі витягнутого еліпсоїду обертання («нанорис») теоретично досліджено дипольно-обмінні спінові збудження типу «стоячі хвилі» з урахуванням анізотропії. Для металевої нанооболонки типу «нанорис» зі слабким зміщенням центру ядра відносно центру зовнішньої границі показано, що врахування квантування спектру значень хвильових чисел та енергій електрону у оболонці призводить до появи осцилюючої залежності компонент поглинання від частоти електромагнітної хвилі, що падає на досліджувану наночастинку. Малий зсув центру ядра «нанорису» відносно центру його зовнішньої границі призводить до появи поправок до компонент провідності. Відносні значення цих поправок є різними для всіх трьох компонент провідності, проте, всі вони є пропорційними до квадрату величини вказаного зсуву.

6. Для періодично-структуреної нанотрубки з легкоосьового феромагнетика колового перерізу знайдено закон дисперсії та спектр значень радіальних хвильових чисел спінових хвиль. Знайдено ефективне повне квазі-хвильове число спінової хвилі. Показано, що для довгих хвиль (з довжиною хвилі, набагато більшою за просторовий період нанотрубки) ефективне квазі-хвильове число можна виразити через усереднені локальні параметри феромагнетиків трубки, а в спектрі значень частот спінової хвилі є заборонені зони.

7. Для системи антиточок у плівці з двопідграткового антиферомагнетика отримано статичні розподіли вектора антиферомагнетизму. Розроблено метод, що дозволяє зменшити кількість граничних умов, необхідних для знаходження зазначених розподілів, що відповідають умовам мінімуму енергії антиферомагнетику. Для спінових хвиль отримано новий клас автомодельних розв'язків рівняння для вектора антиферомагнетизму. Отриманий клас включає як частковий випадок нелінійні спінові хвилі, зокрема, спінові солітони.

Результати роботи є обґрунтованими та достовірними. Їх достовірність та обґрунтованість забезпечується тим, що результати одержані за допомогою комплексу надійно апробованих методів теоретичної та математичної фізики; розрахунки граничних випадків не суперечить відомим із літератури даним. Слід відзначити також, що основні результати роботи пройшли апробацію на міжнародних наукових конференціях та семінарах.

Наукове та практичне значення отриманих результатів достатньо вагоме. З фундаментальної точки зору, сукупність отриманих у дисертаційній роботі результатів являє собою значний внесок у теорію динамічних властивостей неоднорідних наноструктурованих магнітних систем.

В цілому, робота справляє позитивне враження. Дисертація добре написана і оформленена, хоча є і недоліки. Серед зауважень до роботи відзначу наступні.

1. Відзначу загальний недолік роботи. А саме, результати теоретичних розрахунків наведені у формі громіздких виразів. Дуже часто самі ці вирази ще й містять кілька спецфункцій [див., наприклад, формули (3.2.33), (3.2.43), (3.5.47), (5.2.17), (5.2.18), (5.3.19); в авторефераті, наприклад, формули (6), (7), (23), (24)]. Це ще не «катастрофічно», але саме нові результати, що є у цих формулах недостатньо проаналізовані. Границі випадки, що розглянуті в роботі, як правило це такі, коли параметри системи переходить у випадки з вже добре відомими результатами. А самі нові результати, що безумовно є у цих формулах, проаналізовані недостатньо. Скоріш за все, для цього потрібно було зробити числовий аналіз цих формул і представити їх в графічному вигляді, але у більшості випадків це відсутнє. Тобто, результати є, але вони надані у такій формі, що унеможливлює читачеві їх осмислення з точки зору *фізичного змісту*.

2. В розділах 3.5, 4.3, 5.3 досліджується поглинання світла у металевих наносистемах оболонкового типу, отримані і аналізуються вирази для компонент провідності [дивись, наприклад, вирази (3.5.33) (3.5.34), (4.3.41), (4.3.45) або (12) та (18) в авторефераті]. Одним з результатів цих досліджень є ствердження щодо осцилюючої залежності компонент тензору провідності від частоти електромагнітної хвилі, що падає на наносистему. Цей висновок зроблено з аналізу поведінки функцій, що входять у вирази для компонент провідності: дивись Мал. 3.14, Мал. 4.7, Мал. 5.5. (Мал. 7 та 9 в авторефераті). З точки зору фізики, цей ефект дійсно може бути одним з проявів дискретності спектру енергій електрона в металі. Але з точки зору математики, те що складові є осцилюючими функціями ще не значить, що комбінація цих функцій є теж осцилюючою функцією. Приклад: $\sin\phi$ та $\cos\phi$ є осцилюючими функціями, але $\sin^2\phi + \cos^2\phi = 1$. Тобто, висновок щодо осцилюючої залежності компонент тензору провідності бажано було би доповнити графіками для самої провідності. Ці графіки були би дуже слушними оскільки дисерант відзначає, що аналогічний ефект спостерігався експериментально для металевих нанодротів. На мій погляд, значення результату суттєво би зросла від порівняння теоретичної осцилюючої

залежності компонент тензору провідності з експериментальною. Це було б також і поясненням та встановленням фізичного механізму появи таких осциляцій.

3. У вступі до розділу 6 «Спінові хвилі у феромагнітний плівці з періодичною системою антиточок» автор аргументує свою діяльність такими словами (с. 244) «... Неважаючи на зазначену вище перспективність для численних технічних застосувань, СХ у деяких видах магніонних кристалів залишаються практично недослідженими. ... Крім того, порівняно малодослідженими є періодичні системи феромагнітних антиточок (антиточка далі – АТ), а СХ у таких системах практично не досліджуються теоретично.»

Я не можу погодитися з таким ствердженням. Наведу, як приклад, дослідження, що проводились на цю тему у нас, в Україні: *теоретична* А.І. Марченко, В.Н. Криворучко «Магнітная структура и резонансные свойства гексагональной решетки антиточек». ФНТ, т. 38, с.195 (2012), та *експериментальна* А. Vovk, V. Golub, O. Salyuk, V. N. Krivoruchko, A. I. Marchenko «Evolution of the ferromagnetic resonance spectrum of a hexagonal antidot lattice with film thickness: Experiment and numerical simulations.» J. Appl. Phys. 117, 073903 (2015). На жаль, посилання навіть на ці роботи у дисертації відсутні, що досить дивно, бо співавторами експериментальної роботи є співробітники Інституту магнетизму, інституту, у спецраді якого і проходить захист дисертації !

4. Є зауваження і щодо результату, що виносиється на захист. Сформульовано результат так: «Для тонкої феромагнітної (легкоосьовий феромагнетик) плівки з двовимірною періодичною системою колових антиточок теоретично досліджено дипольно-обмінні спінові хвилі з урахуванням анізотропії. Для випадку, коли антиточки є віддаленими (відстань між ними набагато більша за обмінну довжину), досліджено два типи розв'язку рівняння для магнітного потенціалу. Для обох типів отримано закони дисперсії та відношення між компонентами хвильового вектору. Показано, що в спектрі значень частот спінової хвилі наявні заборонені зони.» (див. с. 328 в дисертації, с. 33 в автoreфераті).

Але цей висновок не зовсім коректне сформульовано. Справа в тому, що ці результати отримано для дуже певних умов. А саме, цитую « ... Будемо вважати, що зовнішнє магнітне поле $H_0^{(e)}$, у якому знаходиться плівка, є однорідним та спрямоване уздовж осі Oz. Якщо плівка є досить тонкою або зовнішнє поле досить сильним ... , вектор рівноважної намагніченості M_0 має наблизено однорідний розподіл, а внутрішнє магнітне поле також спрямовано уздовж осі Oz.» (див. с. 256 в дисертації). В автoreфераті аналогічне ствердження сформульовано так: «Плівка вважається досить тонкою, а зовнішнє магнітне поле досить сильним для того, щоб M_0 та $H_0^{(i)}$ в плівці були наблизено однорідними.» (с. 27, текст перед формулою (29); всі підкреслення мої).

На справді, це дуже суттєві вимоги щодо магнітного стану системи. Як це показано, наприклад, у вже цитованих вище роботах ФНТ та J. Appl. Phys., типовою є ситуація коли статичне магнітне упорядкування плівки з антиточками дуже неоднорідне. Мое зауваження є в тому, що в формульованих висновках, що виносиється на захист, ці суттєві вимоги щодо магнітного стану системи не вказані.

Втім, зазначені вище зауваження не впливають на достовірність наукових положень і загальну позитивну оцінку представленої до захисту дисертаційної роботи. Деякі з них слід розглядати як побажання автору для його майбутньої роботи.

Оформлення та зміст дисертації відповідає вимогам ВАК України. Результати дисертації адекватно відображені у достатній кількості публікацій і неодноразово обговорювалися на наукових симпозіумах та конференціях.

На мій погляд, автореферат достатній мірі відображає основні результати дисертації та положення, що виносяться на захист, хоча й він містить деякі недоліки. Так, наприклад, на с. 9 читаємо «У публікації [26] дисертант є співавтором проведених у роботі розрахунків ...». Але якщо подивитися у списку публікацій на послання [26], то виявляється, що там всього один автор - Куліш В.В.? Формули (13) та (19) для функцій $g_{cyl}(v)$ та $g_{sph}(v)$ мають позначення, які зовсім не зрозумілі читачеві автореферату. І тільки у Додатку Г повного тексту дисертації вказано, що це границі інтегрування.

Мета, задачі та предмет досліджень дисертаційної роботи, використовані методики досліджень, основні наукові положення та висновки роботи відповідають паспорту спеціальності 01.04.11 – магнетизм. В цілому, у дисертації наведено низку нових результатів, які дають можливість краще зрозуміти фундаментальні фізичні властивості наноструктурованих магнітних систем. Вони будуть сприяти постановці нових експериментальних досліджень в фізиці магнітних явищ і ініціювати подальший розвиток теоретичних уявлень про властивості наноструктурованих магнетиків.

Результати, що виносяться на захист, базуються на своєчасно опублікованих автором наукових працях в провідних світових та вітчизняних наукових виданнях. Результати дисертаційної роботи викладено у 26 наукових статтях у міжнародних та вітчизняних фахових виданнях, з яких в 14 дисертант є одноосібним автором.

Вважаю, що робота «*Магнітні спін-хвильові та одноелектронні оптичні властивості наносистем оболонкового типу*» відповідає вимогам ВАК України щодо докторських дисертацій, а її автор, Куліш Володимир Вікторович, заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.11 – магнетизм.



Офіційний опонент,
доктор фізико-математичних наук, професор,
заступник директора ДонФТІ ім. О.О. Галкіна НАН України,
лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки

Криворучко В. М.