

ВІДЗИВ

офіційного опонента на дисертаційну роботу
Харлан Юлії Ігорівни
«Вплив структури та конфігурації феромагнітних планарних наносистем
на їхні магніторезонансні властивості»,
подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії
з галузі знань «10 Природничі науки»
за спеціальністю «104 Фізика та астрономія»

Розвиток технологій потребує підвищення ефективності та швидкості обробки даних. Однак нині є низка нерозв'язаних проблем, які пов'язані з обмеженням швидкості запису інформації через повільну зарядку конденсаторів і великі теплові втрати. Виникає потреба в пошуку альтернативних підходів до запису й обробки інформації, заснованих на інших фізичних принципах. Одними з найбільш перспективних шляхів в цьому напрямі є використання магнетної нанoeлектроніки, що ґрунтується на фізичних принципах спітроніки та магнітоніки, які пропонують використовувати спін або спіновий струм для запису, зчитування й обробки інформації. Це уможливило б на 2–3 порядки зменшити теплові втрати та істотно підвищити швидкість запису інформації у порівнянні з сучасними напівпровідниковими системами.

Але для розвитку цього напрямку та реалізації методів обробки інформації на основі спінових ефектів у реальних пристроях необхідно розв'язати достатньо велику кількість фундаментальних і прикладних задач. Однією з головних проблем є розробка методів керування динамікою намагнетованості та магнетними параметрами таких систем (магнетна анізотропія, резонансна частота, ширина резонансної лінії, обмінна константа тощо). В даній дисертаційній роботі запропоновано шляхи контролю магнетних параметрів матеріалів, які можуть використовуватися для виготовлення елементів приладів спітроніки. Тому тема дисертаційної роботи є безумовно *актуальною*.

Актуальність роботи також підтверджується тим, що основні результати було одержано під час виконання конкурсних і відомчих програм: «Розробка фізичних основ магнітної нанoeлектроніки» (2021–2022 рр., номер держ. реєстр. 0120U104903), «Фізичні основи створення функціональних матеріалів для магнітної нанoeлектроніки» (2019–2021 рр., номер держ. реєстр. 0119U001229), «Магнітна динаміка композитних наноструктур з антиферомагнітним зв'язком» (2022–2026 рр., номер держ. реєстрації 0122U001885), а також НДР молодих вчених НАН України «Ефекти квантування та дипольного закріплення спінових хвиль у мікрохвильовій динаміці магнітних наноструктур» (2019–2020 рр., номер держ. реєстрації 0119U102487), «Спінові збудження у магнітних нанoeлементах при зниженні симетрії магнітного стану» (2021–2022 рр., номер держ. реєстр. 0121U111807).

Дисертація пані Ю. І. Харлан має елементи *наукової новизни*. Серед них можна зазначити наступні:

- показано, що у Гойслерових стопах наявний слабкий антиферомагнетний обмінний зв'язок між феромагнетними двійниковими варіантами, який на два–три порядки нижче за відповідну енергією у звичайних антиферомагнетиках, що робить їх подібними до штучних антиферомагнетних надґратниць;

- виявлено, що у Гойслерових стопах феромагнетний обмінний зв'язок між двійниковими варіантами з одновісними анізотропіями, орієнтованими ортогонально, приводить до формування гігантської магнетної анізотропії четвертого порядку, яка на порядок величини більша за типові значення кристалічної анізотропії четвертого порядку в звичайних феромагнетиках за умови, що обмінна взаємодія є порівнянною з полем одновісної анізотропії;
- теоретично досліджено модифікування магнетних властивостей у просторово неоднорідних епітаксіальних плівках стопів з ефектом пам'яті форми у мартенситному стані зі зміною температури; показано, що просторова неоднорідність матеріалу зумовлює дисперсію локальних температур мартенситного перетворення та температур Кюрі, що приводить до варіації значень локальної магнетної анізотропії та намагнетованості відповідно; відповідний модель дає змогу описати різке розширення лінії феромагнетного резонансу за низьких температур і незначне розширення за високих температур, що спостерігається експериментально в епітаксіальних плівках стопів з магнетною пам'яттю форми;
- експериментально та теоретично досліджено стоячі спінові хвилі в трикутних нанoeлементах (трикутних призмах і зрізаних пірамідах), намагнетованих перпендикулярно до площини масиву; розроблений теоретичний підхід уможливорює описувати стоячі спінові хвилі в довільних правильних n -кутних нанопризмах (включаючи циліндр), в яких латеральні розміри порівнянні з висотою;
- теоретично пояснено експериментально спостережене явище нетипового одночастотного резонансного відгуку в тонких циліндричних нанoeлементах за відхилення зовнішнього поля на певний критичний кут від нормалі диску; це пояснюється злиттям спін-хвильових власних мод з переходом спін-хвильової дисперсії від типу прямих об'ємних хвиль до зворотніх об'ємних.

Наукове та практичне значення одержаних результатів полягає в наступному: 1) виявлений антиферомагнетний обмін у мартенситній фазі магнетних стопів з ефектом пам'яті форми дає змогу створювати самоорганізовані антиферомагнетні структури, а ефект гігантської анізотропії четвертого порядку відкриває можливості для поліпшення багатьох магнетних пристроїв, зокрема магнеторезистивних Уінстонових містків; 2) підхід до опису резонансної ширини лінії феромагнетного резонансу може застосовуватися для аналізу магнетної сприйнятливості, гістерези та температурної поведінки магнетної анізотропії відповідних систем; 3) дослідження стоячих спінових хвиль у трикутних нанoeлементах сприяє підвищенню щільності запису інформації, а виявлення критичного кута намагнетованості, за якого спектри хвиль у циліндричних елементах стають одночастотними, є перспективним для створення систем із низьким магнетним шумом для обробки та запису інформації.

Дану дисертацію викладено на 152 сторінках машинописного тексту, а за своєю структурою вона складається з переліку умовних позначень, Вступу, чотирьох розділів, Висновків, Списку використаних джерел, що містить 140 посилань на літературні джерела, та одного додатку.

У *Вступі* обґрунтовано актуальність теми дослідження, показано зв'язок дисертаційної роботи з науковими темами Інституту, визначено мету, завдання,

об'єкт, предмет і методи дослідження, розкрито наукову новизну та практичне значення результатів роботи, особистий внесок дисертантки у працях, опублікованих у співавторстві, зазначено апробацію результатів дисертації.

У *першому* розділі наведено змістовний літературний огляд відомостей про явище феромагнетного резонансу та спінові хвилі. Наведено рівняння Ландау–Ліфшиця — основне рівняння для опису магнетної динаміки, яке, зокрема, використовується для знаходження дисперсійного співвідношення для спінових хвиль. Розглянуто загальний вигляд повної енергії феромагнетика, обговорено енергетичні внески диполь-дипольної, Зеєманової й обмінної взаємодій, а також магнетокристалічної анізотропії. Окрім того, представлено низку прикладів розв'язку рівняння Ландау–Ліфшиця для систем з різноманітними анізотропією форми та типом магнетокристалічної анізотропії; виведено дисперсійне співвідношення для випадку однорідного феромагнетного резонансу, стоячих по товщині плівки та біжучих спінових хвиль.

В якості зауваження до першого розділу слід зазначити, що, окрім загального огляду теорії, було б доцільно навести більше інформації про сучасний стан заданої проблематики та зазначити місце даної дисертації у вирішенні конкретних задач сьогодення.

У *другому* розділі досліджено вплив обмінної взаємодії на межах двійникових компонент у стопах з ефектом пам'яті форми. Показано, що слабкий антиферомагнетний зв'язок між двійниковими компонентами приводить до розщеплення резонансних ліній для мартенситної фази, що дає змогу використовувати такі матеріали як самоорганізовані синтетичні антиферомагнетики. Окрім того, вивчено ефект гігантської магнетної анізотропії четвертого порядку, зумовленої взаємодією двійників із різними анізотропіями. Цей ефект має потенціал для створення пристроїв пам'яті з виродженими магнетними станами та для зменшення критичних струмів у спінових системах.

До другого розділу є два зауваження-запитання: 1) на Рис. 2.3 спостерігається «відмінна відповідність між теоретичними та експериментальними залежностями» резонансних полів від температури, але вище температури у 220 К невідповідність у їхній поведінці стає помітною (й істотною, особливо для поля $H_{R3}(T)$), і це потребує додаткових коментарів; 2) було б доцільно нагадати про спосіб розрахунку параметрів дипольної взаємодії між двійниковими варіантами, які використовуються в аналітичних розв'язках (2.15) і (2.16) рівняння (2.2).

У *третьому* розділі розроблено теоретичний модель, що описує феромагнетний резонанс у просторово неоднорідних епітаксіальних плівках із мартенситним фазовим переходом. Цей модель ґрунтується на теорії Ландау мартенситного перетворення та статистичному описі в Гауссовому наближенні. Окрему увагу приділено аномально сильній температурній залежності параметрів кристалічної гратниці мартенситної фази, що значно впливає на резонансне значення зовнішнього магнетного поля. Зокрема, показано, що звуження резонансного піку, яке спостерігається під час охолодження зразків нижче температури Кюрі, зумовлено цими температурними змінами. Крім того, розглянуто вплив просторової неоднорідності матеріалу, що спричиняє дисперсію локальних температур мартенситного перетворення та відповідну варіацію магнетної анізотропії. Цей ефект пояснює різке розширення лінії феромагнетного резонансу, яке спостерігається в експериментах за низьких температур. Запропонова-

ний підхід уможлиблює не лише аналізувати поведінку ширини резонансної лінії, а й досліджувати інші магнетні параметри: магнетну сприйнятливість, петлі магнетної гістерези тощо.

До третього розділу дисертації є наступне запитання: на основі яких міркувань для моделювання, зокрема, температурної залежності ширини резонансного піку використовувалося саме наближення у вигляді виразу (3.8) разом із формулою (3.9)?

Четвертий розділ зосереджено на впливі намагнетованості та поля знемагнетування на спектер стоячих спінових хвиль у магнетних нанoeлементax. Досліджено спінові хвилі в трикутніх нанoeлементax, де їхню спектральну різноманітність зумовлено анізотропією магнетних властивостей. Також пояснено явище одночастотного резонансного відгуку в циліндричних нанoeлементax під час прикладення магнетного поля під критичним кутом, що відкриває можливість створення систем зі спектрально вузьким магнетним шумом і підвищення щільності запису інформації.

До 4-го розділу є зауваження-запитання: оскільки з відхиленням намагнетованості від нормалі у знемагнетувальному факторі форми (4.21) мають з'явитися також члени з Бесселевими функціями більш високих порядків, що, зокрема, приведе до додаткового розщеплення спін-хвильових мод, то чи не буде це істотно впливати на результати, одержані в рамках запропонованого тут моделю для спектру спінових хвиль?

Але зазначені зауваження не є принциповими і не понижують наукову та практичну цінність результатів і висновків даної дисертаційної роботи.

Обґрунтованість і вірогідність одержаних дисертанткою результатів дослідження забезпечуються використанням перевірених теоретичних моделей і порівнянням з експериментальними даними та результатами комп'ютерного моделювання.

Наукові положення та висновки дисертації сповна викладено в 6 статтях у високореєтингових журналах (4 з яких віднесено до квартилю Q1) і їх було проіндексовано в наукометричній базі даних Scopus. Результати наукових досліджень, що представлені у дисертації, доповідалися й обговорювалися на 12 міжнародних конференціях.

Отже, дисертаційна робота пані Ю. І. Харлан «Вплив структури та конфігурації феромагнітних планарних наносистем на їхні магніторезонансні властивості» є завершеним самостійним дослідженням, яке за науковою новизною, обґрунтованістю, науковою та практичною значущістю одержаних результатів відповідає вимогам пп. 9–18 «Порядку проведення експерименту з присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України №167 від 6 березня 2019 року, а її авторка (вже з індексом Гірша $h = 5$), — Юлія Ігорівна Харлан, — безумовно заслуговує на присудження їй наукового ступеня доктора філософії з галузі знань «10 Природничі науки» за спеціальністю «104 Фізика та астрономія».

Директор Інституту металофізики
ім. Г. В. Курдюмова НАН України
чл.-кор. НАН України, д-р фіз.-мат. н., проф.



Валентин ТАТАРЕНКО