

ВІДГУК
офіційного опонента
Лізунова Вячеслава Вячеславовича
на дисертаційну роботу **ПОПАДЮК Дарії Леонідівни**
«Вплив кристалічної структури на магнітостатичні та магнітодинамічні властивості
епітаксialьних плівок сплавів Гейслера»,
подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії
у галузі 10 «Природничі науки»
за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали»

Магнетні матеріали широко використовуються в різних галузях сучасної науки і техніки. Вони є базовими для створення елементів багатьох пристроїв, від трансформаторів та електродвигунів до систем запису та оброблення інформації. Так, магнетні матеріали досить активно використовуються в біології та медицині, зокрема, магнетно-резонансній томографії, системах візуалізації внутрішніх органів, цільовій доставці ліків, тощо. При цьому зараз активно використовуються або мають перспективу застосування стопи Гейслера, які демонструють широкий спектр магнетних властивостей, для створення актуаторів, магнетних датчиків, базових елементів пристроїв спінтроники та магноники. Саме дослідження плівкових структур на основі цих сполук і присвячена дана дисертаційна робота.

Основною проблемою на шляху використання стопів Гейслера є те, що на їхні властивості суттєво впливає їхня мікро та мезоскопічна кристалічна структура, впорядкованість, однорідність, тощо, які визначаються технологією отримання. Саме тому проблема встановлення взаємозв'язку між кристалічною структурою та фізичними характеристиками цих матеріалів, а також розробка методів їхнього контролю є *актуальною задачею*. В даній дисертаційній роботі розглянуті важливі питання щодо фізичних закономірностей формування магнетних характеристик епітаксialьних плівок стопів Гейслера.

Дисертацію складається з Вступу, чотирьох розділів, Висновків, Списку використаних джерел. Вона викладена на 133 сторінках машинописного тексту. Дисертація в цілому написана грамотною українською мовою, стиль викладення матеріалу відповідає прийнятому в науковій літературі.

Вступ присвячено формулюванню основних положень щодо актуальності обраної теми, основної мети та завдань, об'єкту і предмету дослідження. Також представлено ключові наукові положення, які виносяться на захист і відображають новизну отриманих результатів, показано особистий внесок здобувача у виконанні роботи. Наведено інформацію про апробацію наукових результатів на наукових фахових конференціях та про зв'язок дисертаційного дослідження з науково-дослідницькими роботами, в яких приймала участь дисертантка.

Значну частину *Першого розділу* присвячено сучасному стану досліджень стопів Гейслера і, зокрема, тонких плівок цих матеріалів. Зроблено огляд проблематики сучасних світових досліджень та визначено основні тенденції цього наукового напрямку. Наведено основну інформацію про структуру та магнетні властивості стопів Гейслера та характерні особливості фізичних параметрів тонких епітаксialьних плівок таких систем.

Огляд експериментальних методик, які використовувались для отримання результатів даної роботи, представлено в *Другому розділі*. Надано короткий екскурс щодо основних

фізичних принципів досліджень та особливостей устаткування, яке використовувалось дисертанткою.

В *Третньому розділі* викладено оригінальні результати, одержані авторкою, щодо дослідження структурних, магнетостатичних та магнетодинамічних властивостей епітаксialьних плівок стопу Co_2FeGe , осаджених на монокристалічні підкладки. З моєї точки зору найбільш вагомим результатом цього розділу є встановлення немонотонного характеру впливу термічного оброблення на фізичні параметри плівкових структур та пошук шляхів оптимізації технології отримання потрібних магнетних властивостей плівок.

В *Четвертому розділі* наведено результати досліджень епітаксialьних плівок стопів з магнетним ефектом пам'яті форми та впливу просторово-періодичної нанодвійникової структури на їхні магнеторезонансні властивості. Проаналізовано характер взаємодій, які визначають фізичну поведінку таких систем. Також проаналізовані механізми формування просторово періодичної двійникової структури в тонких плівках стопів з ефектом пам'яті форми та вплив товщини плівок на період такої структури.

Обґрунтованість і достовірність одержаних результатів, сформульованих в цьому дослідженні, обумовлено адекватним вибором широкого спектру експериментальних методів (для верифікації зроблених висновків використовувались дані кількох різних незалежних методик). Проведено детальне порівняння з експериментальними результатами, отриманими в провідних світових наукових центрах, з аналітичними теоріями та результатами мікромагнетного моделювання.

В якості *нових оригінальних наукових результатів*, отриманих в рамках цієї дисертації слід відмітити наступні:

- Проведено систематичні дослідження формування нанодвійникової структури в епітаксialьних плівках стопів з магнетним ефектом пам'яті форми $\text{Ni}(\text{Co})\text{MnSn}$ різної товщини та показано, що в таких системах формується просторово періодична двійникова структура, характерний період якої описується розмірним законом Ландау–Лівшиця, що обумовлено пружними енергіями, які виникають на інтерфейсі плівка/підкладка та в границях двійників.
- Показано, що наявність періодичної нанодвійникової структури призводить до суттєвої модифікації їхніх магнеторезонансних властивостей $\text{Ni}(\text{Co})\text{MnSn}$ і така система є аналогічною до синтетичних антиферромагнетиків за рахунок того, що обмін на границях двійників не лише змінює величину, а й знак по відношенню до обміну в середині двійникових варіантів.
- Проведено комплексні дослідження впливу кристалічної структури на магнетостатичні та магнетодинамічні параметри тонких епітаксialьних плівок Co_2FeGe і визначено деякі основні закономірності впливу технології виготовлення на такі магнетні характеристики, як намагнетованість насичення, обмінна жорсткість та магнетодинамічні втрати. Визначено умови для отримання зразків з оптимальними параметрами для застосування в елементній базі магнітоелектроніки.

Результати отримані автором безумовно мають як *наукове* так і *практичне значення*:

- Можливість створення просторово-періодичних нанодвійникових структур в епітаксialних плівках магнетних стопів з ефектом пам'яті форми та керування параметрами таких структур відкриває шлях для використання таких систем в якості магнетонних та магнетофотонних кристалів, а також для створення різноманітних датчиків на їхній основі.
- Аналіз впливу технологічних параметрів на кристалічну структуру, магнетостатичні і магнетодинамічні характеристики тонких епітаксialних плівок Co_2FeGe уможливорює створення матеріалів з контрольованими значеннями магнетних параметрів, що є необхідним для виготовлення елементів високошвидкісних систем оброблення інформації нового покоління.
- Сильна гібридизація спінових хвиль в тонких епітаксialних плівках Co_2FeGe та низькі магнетодинамічні втрати вказують на потенціальну можливість використання цього матеріалу в магнетонних схемах обробки сигналів.

До дисертаційної роботи слід зробити ряд зауважень:

1. В огляді літератури (Перший розділ) переважно використано наукову літературу, опубліковану десять та більше років назад, і лише 9 робіт з 86 опубліковано після 2015 року. При цьому кожен рік публікуються сотні статей, присвячені дослідженню стопів Гейслера. Вважаю, що і огляд літератури, і дисертаційна робота в цілому виграли б, якщо при проведенні порівняльного аналізу більш широко використовувались «свіжі» літературні джерела.

2. Авторкою зазначено, що досліджені в дисертаційній роботі плівки Co_2FeGe мають мозаїчну структуру, а їхня товщина близька до 60 нм. Оскільки розглядаються кристалічні системи, ефекти багатократності розсіювання (динамічні ефекти) Рентгенового випромінювання можуть відігравати суттєву роль. Чи були зроблені оцінки, які дозволили знехтувати внеском динамічної дифракції.

3. У дисертаційній роботі зустрічаються друкарські та стилістичні помилки, що, однак, не заважає розумінню тексту дисертації.

Проте зроблені зауваження не впливають на загальну високу оцінку результатів роботи, що виносяться на захист, та, певною мірою, носять характер побажань для подальших наукових досліджень. Достовірність одержаних результатів та обґрунтованість висновків зумовлені та підтверджуються використанням адекватних теоретичних моделей та експериментальних методів, узгодженістю одержаних результатів з результатами інших авторів для аналогічних випадків та результатами експериментальних досліджень.

Результати, які увійшли в дисертаційну роботу досить **повно відображені** в чотирьох статтях у провідних наукових фахових міжнародних журналах, що індексуються міжнародними наукометричними базами даних Scopus та Web of Science та відносяться до кuartилів Q1 та Q2. Матеріали дисертаційної роботи було обговорено на міжнародних фахових конференціях.

Отже, можна зробити висновок, що за рівнем актуальності вибраної тематики, новизни, наукового та практичного значення одержаних результатів дисертаційна робота «Вплив кристалічної структури на магнітостатичні та магнітодинамічні властивості епітаксialних плівок сплавів Гейслера» відповідає спеціальності 105 «Прикладна фізика та наноматеріали»,

вимогам встановленим «Порядком 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 року № 44 (зі змінами і доповненнями від 21.03.2022 р. № 341, від 19.05.2023 р. № 502, від 03.05.2024 р. № 507), а її авторка Попадюк Дарія Леонідівна заслуговує на присудження звання доктора філософії з галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали».

Офіційний опонент:

заступник директора з наукової роботи
Інституту металофізики ім. Г.В.Курдюмова
Національної академії наук України
доктор фізико-математичних наук, професор



Вячеслав ЛІЗУНОВ