

ВІДГУК

офіційного опонента д.ф.-м.н., доц. **Савченко Дарії Вікторівни** на дисертаційну роботу ПОПАДЮК Дарії Леонідівни на тему: «Вплив кристалічної структури на магнітостатичні та магнітодинамічні властивості епітаксіальних плівок сплавів Гейслера», подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 Прикладна фізика та наноматеріали

Детальний аналіз дисертації Попадюк Д.Л. «Вплив кристалічної структури на магнітостатичні та магнітодинамічні властивості епітаксіальних плівок сплавів Гейслера» дозволяє сформулювати наступні узагальнені висновки щодо актуальності, ступеня обґрунтованості основних наукових положень, висновків, рекомендацій, достовірності, наукової новизни, практичного значення, а також загальної оцінки роботи.

Актуальність теми дисертаційного дослідження.

Актуальність дослідження зумовлена унікальними фізичними властивостями сплавів Гейслера, зокрема їх потенційною стовідсотковою спіновою поляризацією, низьким коефіцієнтом магнітного затухання та можливістю формування нанодвійникової структури, що робить їх надзвичайно перспективними для застосування в спінтроніці та магنونіці.

Сплави Гейслера знаходять широке застосування в галузі спінтроніки – перспективного напрямку електроніки, що базується на використанні спінових властивостей електронів. Завдяки високій спіновій поляризації, деякі з цих сплавів можуть забезпечити ефективне інжектування спін-поляризованого струму в напівпровідникові та металеві структури. Крім того, завдяки низькому коефіцієнту магнітного затухання, ці матеріали придатні для створення елементів магنونіки – технології обробки інформації на основі спінових хвиль, що дозволяє значно зменшити енергоспоживання в порівнянні з традиційною електронікою.

Завдяки своїм магнітним і магнітопружним властивостям, сплави Гейслера використовуються в сенсорних елементах, зокрема в магніточутливих датчиках, що знаходять застосування в автомобільній, авіаційній промисловості та медицині. Сплави з ефектом пам'яті форми демонструють можливість магнітно-індукованих деформацій, що відкриває шлях до створення високошвидкісних мікроактуаторів. Також, у зв'язку з високою температурною стабільністю та можливістю досягнення гігантського магнітоопору, ці матеріали застосовуються в енергонезалежних магнітних системах зберігання даних, таких як MRAM (magnetoresistive random access memory).

У дисертаційній роботі досліджуються епітаксіальні плівки сплавів Co_2FeGe та $\text{Ni}(\text{Co})\text{MnSn}$, які належать до класу повних та функціональних сплавів Гейслера відповідно. Актуальність використання сплаву Co_2FeGe зумовлена його потенційно високою спіновою поляризацією та винятково низьким коефіцієнтом магнітного затухання – одними з найнижчих серед усіх відомих металічних феромагнетиків, що робить його ідеальним кандидатом для високошвидкісних магنونних і спінтронних пристроїв. З іншого боку, плівки

Ni(Co)MnSn завдяки формуванню нанодвійникової структури демонструють ефекти, аналогічні синтетичним антиферомагнетикам, що відкриває нові можливості для створення магнітофотонних та сенсорних систем. Крім того, варіювання композиції цих сплавів дозволяє тонко налаштовувати їхні магнітні параметри відповідно до вимог конкретного пристрою або технологічної задачі.

Таким чином, дослідження епітаксialних плівок сплавів Co_2FeGe та Ni(Co)MnSn є надзвичайно актуальним завдяки їх унікальним магнітним та магнітодинамічним властивостям, які критично важливі для створення сучасних високошвидкісних елементів спінтроніки та магنونіки.

Обрані у дисертаційній роботі методи атомно-силової мікроскопії (AFM), енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії (EDX), рентгенівської дифракції (XRD), вібраційної магнітометрії (SQUID), феромагнітний резонанс (ФМР), бріллюенівське розсіювання світла є одними з найбільш інформативних та доповнюючи один одного методів для дослідження кристалічної структури на магнітостатичні та магнітодинамічні властивості епітаксialних плівок сплавів Гейслера.

Актуальність теми підтверджується також і тим, що дисертаційна робота виконана відповідно до основних наукових напрямків діяльності Інституту магнетизму імені В.Г. Бар'яхтара Національної академії наук України і виконувалась у рамках гранту Національного фонду досліджень України «Розробка фізичних основ магнітної наноелектроніки» (2021-2023 рр., номер держ. реєстр. 0120U104903, 0121U111274, 0123U102612), в рамках відомчих тем «Фізичні основи створення функціональних матеріалів для магнітної наноелектроніки» (2019-2021 рр., номер держ. реєстр. 0119U001229), «Магнітна динаміка композитних наноструктур з антиферомагнітним зв'язком » (2022-2026 рр., номер держ. реєстрації 0122U001885). Авторка є одним з виконавців цих робіт, і її науковий внесок в них відображений в дисертації.

Основні наукові положення, висновки і рекомендації, що сформульовані у дисертації, ступінь їх обґрунтованості і достовірності.

Достовірність та надійність отриманих у дисертаційній роботі результатів забезпечується застосуванням великої кількості сучасних методів досліджень (AFM, EDX, XRD, SQUID, ФМР), використанням чисельних розрахунків і моделювання на ПК, надійною відтворюваністю результатів та доброю їх узгодженістю з літературними даними.

Достовірність одержаних результатів, що полягають у виявленні нових закономірностей між технологічними параметрами осадження, структурною впорядкованістю та магнітодинамічними характеристиками плівок, за допомогою використання комплексу експериментальних методів та чисельного аналізу, не викликає сумніву. Наведені в дисертаційній роботі теоретичні обґрунтування та експериментальні дослідження виконані коректно на високому науковому рівні.

Висновки, які сформульовані в дисертаційній роботі, містять нові науково обґрунтовані експериментальні результати, які є суттєвими для розвитку сучасних технологій синтезу та застосування функціональних

наноструктурованих плівок з керованими магнітними властивостями, що використовуються в енергоефективних інформаційних і сенсорних системах.

Наукова новизна дисертаційної роботи

Дисертанткою отримані наступні основні наукові результати:

1. Формування нанодвійникової структури в епітаксialьних плівках сплавів Ni(Co)MnSn з магнітним ефектом пам'яті форми різної товщини було пояснені в рамках феноменологічної моделі, яка враховує конкуренцію напружень, що виникають на інтерфейсі плівка/підкладка та на границях двійників.

2. Вперше експериментально показано, що магнітно-резонансні властивості нанодвійникової епітаксialьної плівки сплаву Ni(Co)MnSn є аналогічними до резонансних властивостей синтетичних антиферомагнетиків.

3. Встановлено оптимальні умови для отримання зразків з максимальними значеннями намагніченості, обмінної жорсткості та мінімальною спін-динамічною дисипацією енергії, що є необхідним для створення елементів високошвидкісних спінових тронних пристроїв.

3. Встановлено наявність сильної гібридизації спінових хвиль в тонких епітаксialьних плівках Co_2FeGe у геометрії Деймона-Ешбаха, що є привабливим для застосування в магнітонних схемах обробки сигналів.

Практичне значення одержаних результатів.

Практичне значення дисертаційної роботи полягає в наступному:

- явище нанодвійникування в епітаксialьних плівках сплавів з магнітним ефектом пам'яті форми може бути використано для створення магнітонних та магнітофотонних кристалів. При цьому, технологія виготовлення таких кристалів є досить простою, а період отриманих структур можна варіювати в широкому діапазоні;

- нанодвійникові епітаксialьні плівки сплаву Ni(Co)MnSn можуть використовуватися в якості магніторезистивних датчиків, а також мають широку перспективу застосування в різноманітних пристроях спітроніки та магнітоніки;

- встановлена кореляція між технологією отримання, кристалічною структурою та магнітостатичними і магнітодинамічними характеристиками тонких епітаксialьних плівок Co_2FeGe дає можливість для створення матеріалів з контрольованими значеннями магнітних параметрів (намагніченість, обмінна жорсткість, магнітна анізотропія, спін-динамічний коефіцієнт затухання, тощо), що є необхідним для високошвидкісних спітронних пристроїв;

- виявлена сильна гібридизація спінових хвиль в тонких епітаксialьних плівках Co_2FeGe є привабливим для застосування в магнітонних схемах обробки сигналів.

Повнота викладення наукових положень, висновків та рекомендацій в опублікованих працях.

Основні положення дисертаційної роботи опубліковані у 12 наукових працях, з них: 4 статті у виданнях з кваліфікацією Q1 та Q2, включених до міжнародних наукометричних баз даних Scopus/WoS, 8 тез доповідей на

міжнародних наукових конференціях. Відповідно до підпункту 4 пункту 8 Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії (Постанова Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44), кількість публікацій, у яких відображені основні наукові результати, прирівнюється до 8 публікацій.

Отже, обсяг друкованих робіт та їх кількість відповідають вимогам МОН України щодо публікації основного змісту дисертації на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Аналіз змісту дисертації

Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків і списку використаної літератури. Її повний обсяг складає 133 сторінки. Дисертація містить 41 рисунок та 4 таблиці. Перелік використаної літератури в дисертаційному дослідженні складає 157 найменувань.

У вступі Попадюк Д.Л. обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульована мета та задачі досліджень, викладено наукову новизну та практичну значущість отриманих результатів, наведено дані про особистий внесок, публікації та апробацію результатів досліджень.

У першому розділі наведено дані про сучасний стан дослідження тонких плівок сплавів Гейслера та проблематики сучасних світових досліджень в цьому напрямку. Наведена інформація про структуру та магнітні властивості сплавів Гейслера з акцентом на особливості, що є характерними для тонких епітаксіальних плівок цих матеріалів.

У другому розділі наведений короткий огляд експериментальних методів, які використовувались в даній роботі для дослідження структурних та магнітних властивостей зразків (енерго-дисперсійна рентгенівська спектроскопія, рентгенівська дифракція, атомно-силова мікроскопія, вібраційна магнітометрія, феромагнітний резонанс та Бріллюєнівське розсіювання), та базові фізичні принципи, які лежать в їх основі.

У третьому розділі представлено оригінальні результати щодо структури та магнітних властивостей епітаксіальних плівок сплаву Гейслера Co_2FeGe , осаджених на монокристалічні підкладки $\text{MgO}(100)$. Продемонстровано, що вплив температури обробки має немонотонний характер і показані шляхи оптимізації технологічних параметрів для досягнення потрібних магнітних властивостей плівок.

У четвертому розділі наведено результати дослідження впливу мезоскопічної просторово періодичної двійникової структури, яка формується в епітаксіальних плівках сплавів з магнітним ефектом пам'яті форми, на їх магнітні властивості та магнітодинамічні характеристики. Обговорюється механізми формування просторово періодичної двійникової структури в тонких плівках сплавів з ефектом пам'яті форми та вплив товщини плівок на період такої структури.

Загальні висновки по дисертаційній роботі відповідають її змісту, конкретно і стисло висвітлюють основні наукові результати.

Загалом можна зазначити, що дисертаційна робота є закінченою науковою роботою, в якій отримані нові наукові результати, що мають теоретичну та практичну цінність.

Дискусійні положення та зауваження щодо дисертаційного дослідження

Разом з тим, по дисертаційній роботі слід зробити наступні зауваження:

1. Замість терміну «Енергетико-дисперсійна рентгенівська спектроскопія» краще було застосувати усталений термін «Енергодисперсійна рентгенівська спектроскопія».

2. У тексті дисертації слід було обґрунтувати чому у якості підкладинок були застосовані підкладинки MgO , а не, наприклад, SiO_2 , які не дають парамагнітних внесків.

3. Доцільно було б навести приклади експериментальних спектрів ФМР, вимірюваних у плівок $\text{Co}_2\text{FeGe/MgO}$.

4. При аналізі даних, зображених на Рис. 4.1 та 4.2 доцільно було б вказати посилання на літературні дані, на основі яких було зроблено висновки (перший абзац, с. 90).

5. На с. 91 вказано, що «Інтенсивність спектрів є лінійною функцією радіочастотної потужності», проте відповідних експериментальних даних у роботі не наведено.

6. Було б корисно показати резонансні криві від доменних стінок в області низького магнітного поля у $\text{Ni}_{46,0}\text{Mn}_{36,8}\text{Sn}_{11,4}\text{Co}_{5,8}/\text{MgO}$ плівках.

7. Невдалою є фраза у підпису до Рис. 4.5 «Штрихові лінії проведені на око».

8. На Рис. 4.11 та 4.12 слід було ввести позначення різних ліній, спостережених у спектрах від $\text{Ni}_{49,0}\text{Co}_{4,9}\text{Mn}_{35,5}\text{Sn}_{10,6}/\text{MgO}$ плівок.

Є декілька зауважень до оформлення дисертаційної роботи: підписи величин та одиниць вимірювань на рисунках та деяких таблицях не перекладені з англійської мови, на деяких рисунках відсутні одиниці вимірювань величин, посилання у списку літератури оформлені у різних стилях.

У тексті дисертаційної роботи також зустрічаються деякі друкарські помилки, наприклад: «сто відсоткова», «Показало, що вісь анізотропії змінює напрямок...» замість «Показано...» «за при низьких температур», тощо.

Проте зазначені зауваження жодним чином не знижують загальної позитивної оцінки роботи, а лише можуть слугувати предметом наукової дискусії під час захисту представленої дисертаційної роботи та носити здебільшого рекомендаційний характер.

Загальна оцінка дисертаційної роботи

Дисертація Попадюк Д.Л. є структурованою, цілісною, завершеною науково-дослідною роботою, а отримані в ній результати розв'язують актуальну задачу оптимізації структурних та магнітних характеристик функціональних плівкових матеріалів для потреб спінтроніки та магнетики.

Таким чином, на підставі аналізу дисертаційної роботи Попадюк Д.Л. «Вплив кристалічної структури на магнітостатичні та магнітодинамічні властивості епітаксialьних плівок сплавів Гейслера», публікацій дисертантки у

фахових наукових виданнях можна зробити висновок, що дисертаційна робота виконана на належному експериментальному, теоретичному та методичному рівні та відповідає галузі знань 10 – “Природничі науки”, спеціальності 105 – “Прикладна фізика та наноматеріали”, чинним вимогам “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, а за оформленням – відповідає “Вимогам до оформлення дисертації”, затвердженим наказом Міністерства освіти і науки України від 12 січня 2017 р. № 40 (зі змінами). Авторка дисертації Попадюк Дарія Леонідівна заслуговує на присудження ступеня доктора філософії у галузі знань 10 – “Природничі науки” за спеціальністю 105 – “Прикладна фізика та наноматеріали”

Офіційний опонент:

Завідувач кафедри загальної фізики

та моделювання фізичних процесів

Національного технічного університету України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

доктор фізико-математичних наук, доцент

Д.В. Савченко