

**ВІДГУК**  
**офіційного опонента**  
**завідувача відділу радіаційної біофізики Інституту прикладної фізики**  
**НАН України, кандидата фізико-математичних наук, старшого**  
**наукового співробітника**  
**Данильченка Сергія Миколайовича**  
**на дисертацію Салтикова Дмитра Ігоровича**  
**«Особливості електротранспорту в плівкових нанорозмірних системах**  
**на основі феромагнітних сплавів»,**  
**яка подана на захист до разової спеціалізованої вченої Ради**  
**ДФ 55.051.003 у Сумському державному університеті, що подана на**  
**здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань**  
**10 «Природничі науки» за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та**  
**наноматеріали»**

**Актуальність теми дослідження пов'язана з дослідженнями наноматеріалів, які можуть бути використані у наноелектроніці та спінтроніці, бурхливий розвиток якої останнім часом привів до революційних змін у галузі твердотільної електроніки. Цікавим є дослідження і з точки зору фундаментальної фізики, бо дає можливість розширити уявлення про структуру, фазовий склад та фізичні процеси, які протікають у плівкових системах в умовах впливу температурних і магнітних полів. Хоча масивні сплави на основі Fe та Co добре відомі ще з початку минулого століття, але до їх детального дослідження повернулися лише в останній час, коли виникла потреба у магнітом'яких матеріалах для роботи при високих температурах. Це стало поштовхом до розробки та удосконалення наноструктур і композиційно-модульованих структур на основі сплаву  $Fe_xCo_{1-x}$ , який характеризується унікальною комбінацією високої намагніченості насичення, високої температури Кюрі, низької магнітокристалічної анізотропії та хорошої механічної міцності. Інтенсивні дослідження таких сплавів привели до значного поліпшення властивостей та кращого розуміння фазових перетворень у сплавах  $Fe_xCo_{1-x}$ , які ідеально**



підходять для застосувань у магнітних спінових вентилях із можливою реалізацією ефекту гігантського магнітоопору (ГМО).

Для практичного використання згаданих структур у пристроях електроніки необхідно мати оптимальне поєднання функціональних параметрів: величини ГМО, магніторезистивної чутливості, магнітного гістерезису, необхідної величини поля перемагнічування і високої температурної стабільності. Для отримання наноструктур із заданими характеристиками, крім ретельно відпрацьованої технології підготовки підкладок і оптимальних режимів нанесення шарів, необхідне розуміння особливостей впливу мікроструктури шарів, дифузійних процесів між шарами і магнітної анізотропії на їх магніторезистивні властивості. Незважаючи на велику кількість експериментальних та теоретичних досліджень із вивчення цих проблем, низка питань залишалася до кінця не з'ясованою. Тому аргументованою є мета роботи, яка полягала у встановленні загальних закономірностей впливу розмірних, температурних і концентраційних ефектів та умов термооброблення на електро- і магніторезистивні властивості плівкових сплавів  $Fe_xCo_{1-x}$  та тришарових структур на їх основі з прошарком  $Cu$ .

**Загальна характеристика дисертаційної роботи.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі електроніки, загальної та прикладної фізики Сумського державного університету та має зв'язок із науковими темами. Основні результати дисертантом були одержані в процесі виконання держбюджетних науково-дослідних робіт Міністерства науки і освіти України: №0115U000689 «Вплив процесів гранулізації і спін-залежного розсіювання електронів на фізичні властивості плівкових твердих розчинів» (2015-2017 рр.); №0118U003580 «Фазовий склад, електрофізичні та магніторезистивні властивості багатокомпонентних (високоентропійних) плівкових сплавів» (2018-2020 рр.), де він працював як виконавець.

Дисертаційна робота побудована за класичною схемою і складається зі вступу, 5 розділів, висновків та списку використаних джерел.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, встановлено зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, визначено мету і завдання, об'єкт та предмет, методологію дослідження, розкрито наукову новизну і практичне значення результатів дисертаційного дослідження, наведено дані про їх апробацію та наукові публікації.

Перший розділ – це літературний огляд, який присвячено стану дослідження структури, фазового складу та фізичних властивостей залізо-кобальтових сплавів і структур на їх основ. Для його написання використані сучасні наукові джерела, більшість із них це оригінальні статті останніх років видання, що відповідає вимогам до написання дисертацій.

Другий розділ – методика і техніка експерименту, яка включає методики отримання плівок та їх дослідження.

Наступні три розділи – це, безпосередньо, результати дослідження та їх обговорення.

Висновки повністю відповідають змісту роботи.

Проведене в роботі комплексне дослідження кристалічної структури, фазового й елементного складу, електро- та магніторезистивних властивостей плівкових сплавів та тришарових систем на їх основі дозволило одержати нові результати.

**До найвагоміших наукових результатів, що містяться в дисертації слід віднести такі:**

1. Визначено фазовий склад плівкових сплавів  $Fe_xCo_{1-x}$  та тришарових систем на їх основі з прошарком міді залежно від концентрації компонент та температури відпалювання. Свіжосконденсовані плівки сплавів  $Fe_xCo_{1-x}$  ( $x > 0,3$ ) мають ОЦК ґратку з параметром ґратки  $a = 0,292-0,293$  нм; у випадку  $x < 0,3$  – ОЦК -  $Fe_xCo_{1-x-y} + ГЦП - Co_y$  з параметром ґратки  $a = 0,291 - 0,294$  нм та  $a_{Co} = 0,250 - 0,253$  нм і  $c_{Co} = 0,410 - 0,413$  відповідно. Після відпалювання за 700 К для плівок з  $x > 0,3$  фіксується ОЦК -  $Fe_xCo_{1-x}$  та  $Fe_xCo_{1-x-y} + ГЦК - Co_y$  при  $x < 0,3$ . Тришарові плівки  $Fe_xCo_{1-x}/Cu/Fe_xCo_{1-x}$  з  $x > 0,3$ ,  $d_F = 20 - 40$  нм та  $d_N = 5 - 20$  нм мають фазовий склад, який

відповідає евтектиці ОЦК -  $\text{Fe}_x\text{Co}_{1-x}$  + ГЦК т.р. Cu (Fe або Co) незалежно від умов термообробки. При  $x < 0,3$  фазовий склад відповідає ОЦК -  $\text{Fe}_x\text{Co}_{1-x}$  + ГЦК т.р. Cu (Fe, Co).

2. Уперше для плівкових систем залізо-кобальтового сплаву ( $d_F = 10 - 50$  нм) з прошарком міді ( $d_N = 1 - 30$  нм) експериментально досліджено вплив товщини шарів, температури в інтервалі її зміни від 120 до 700 К та концентрації компонент сплаву на ізотропний магнітоопір. Визначено максимальне значення ізотропного магнітоопору за кімнатної температури, яке становить 3,5 % для плівок  $\text{Fe}_{0,1}\text{Co}_{0,9}/\text{Cu}/\text{Fe}_{0,1}\text{Co}_{0,9}$  ( $x \cong 0,1$ ,  $d_F = 30$  нм,  $d_N = 5$  нм).

3. Уперше встановлено, що для всіх досліджених систем спостерігається перехід від ізотропного до анізотропного магнітоопору при поетапному термомагнітному відпалюванні за температур 400, 550 та 700 К. Визначено граничні температури відпалювання для цього переходу залежно від концентрації компонент у сплаві та товщини прошарку міді. Показано, що ізотропність польових залежностей зберігається незалежно від концентрації компонент у разі безпосереднього відпалювання за температури 700 К плівкових систем із товщинами шарів ( $d_F = 20 - 30$  нм,  $d_N = 5 - 10$  нм).

**Практична цінність** результатів проведених комплексних експериментальних досліджень полягає в тому, що вони розширюють уявлення про фізичні процеси у магнітнеоднорідних функціональних плівкових матеріалах приладових структур в умовах впливу на них температурних та магнітних полів. Реалізований підхід дозволив встановити умови формування та подальшого термічного оброблення функціональних матеріалів із високою чутливістю до зміни температури або магнітного поля з високою температурною стабільністю, що можуть бути застосовані як чутливі елементи сенсорів магнітного поля.

Слід зазначити, що результати дослідження впливу термостабілізації на величину ГМО мають прикладне значення та можуть бути застосовані під



час розробки елементів сенсорів магнітного поля, спін-вентилів тощо та у визначенні умов їх експлуатації.

Залежність чутливості електричного опору від магнітного поля в одна- та тришарових плівках, як матеріалах для функціональних елементів датчиків, дає можливість установити швидкість реагування датчика на зміну вхідного сигналу, точність його вимірювання при детектуванні слабких магнітних полів.

**Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків, рекомендацій, сформульованих в дисертації** є достатнім, що підтверджується використанням широкого літературного огляду та емпіричних даних. Дисертантом опрацьовано 171 спеціальних і загальних джерел, у яких відображено різні аспекти обраної тематики дослідження.

Робота містить достатньо великий об'єм експериментального матеріалу, достовірність якого базується на комплексному використанні сучасної бази методик досліджень, таких як електронна мікроскопія, ВІМС, ЕДС та інші, а також комп'ютерної обробки отриманих результатів.

Крім того, достовірність і обґрунтованість наукових результатів та висновків дисертаційної роботи забезпечується систематичністю і повторюваністю даних та узгодженням із результатами інших авторів, отриманих на прикладі плівкових матеріалів аналогічної структури і хімічного складу.

Результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на наукових конференціях і семінарах та відображені у 12 публікаціях: 4 статтях у фахових виданнях України та 1 статті в матеріалах конференції, які індексуються БД Scopus, та 7 наукових працях у матеріалах Міжнародних і Всеукраїнських конференцій.

**Оформлення дисертації** відповідає вимогам, що висувуються до такого виду робіт і наказу Міністерства освіти і науки України № 40 від 12 січня 2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації». Текст дисертації написаний українською мовою в науковому стилі.

Водночас дисертаційне дослідження Салтикова Дмитра Ігоровича містить **дискусійні моменти та недоліки**, висвітлення яких сприятиме більш повній та об'єктивній характеристиці результатів, отриманих автором:

1. Серед задач, які необхідно було вирішити є така «розробити методики одержання плівкових сплавів  $Fe_xCo_{1-x}$  в широкому діапазоні концентрацій компонент та формування тришарових плівкових систем на їх основі та  $Cu$ », але в методиці говориться лише про удосконалення існуючих методик. Тому вважаю таке формулювання некоректним.

2. У літературному огляді представлені деякі дані, які в подальшому не використовуються для обговорення результатів досліджень. Наприклад, висвітлені у розділі 1 результати роботи 39, які стосуються тришарових плівок сплаву  $FeCo$  з товстим прошарком диспрозію.

3. У розділі 2 присвяченому методиці експериментів на рис. 2.3 для прикладу подана гістограма плівки нікеля, хоча досліджуються плівки іншого складу. У цьому випадку треба вказати посилання на літературне джерело. Крім цього на сторінці 62 представлені рис. 2.7 і 2.8, посилання на які в тексті вказані навпаки.

4. У тексті роботи (стор. 69) указано, що «Електронограми від термооброблених за температури 700 К тонкоплівкових сплавів мають лише лінії, які належать ГЦК фазі», хоча з рис. 3.1.е видно, що ці плівки мають двофазний склад - ОЦК -  $Fe_xCo_{1-x-y}$  + ГЦК -  $Co_y$ .

5. На рисунках, на яких представлені результати дослідження ізотопного складу методом ВІМС, не наведена похибка визначення відносної концентрації компонент по глибині.

6. У роботі визначено концентраційні профілі матеріалів, із яких складаються плівки. Проте, не було наведено результатів стосовно профілів розподілу домішкових атомів, що, напевне, виявляються методою ВІМС у плівках внаслідок наявності залишкових газів у вакуумній камері, часткового випаровування матеріалу тиглів, дифузійних процесів від підкладки в плівку тощо.

7. У висновку 4 до розділу 3 автор зазначає, що «для міді характерна зерномежова дифузія», але не дає чіткого пояснення, на чому цей аргумент базується.

**Висновок.** Указані зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи Салтикова Д.І., яка є завершеним науковим дослідженням, у якому отримані нові обґрунтовані експериментальні результати, що розширюють сучасне розуміння питань, пов'язаних з фізичними процесами у плівкових матеріалах на основі феромагнітних сплавів та відповідних структур. Вважаю, що за актуальністю і новизною отриманих результатів, їх рівнем, обсягом, достовірністю та обґрунтованістю, науковим і практичним значенням та оформленням, дисертаційна робота на тему «Особливості електротранспорту в плівкових нанорозмірних системах на основі феромагнітних сплавів», яка підготовлена за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали» відповідає вимогам наказу Міністерства освіти і науки № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» та Постанови Кабінету Міністрів України № 167 від 06.03.2019 р. «Про затвердження Порядку проведення експерименту з присудження ступеня доктора філософії», а її автор – Салтиков Дмитро Ігорович, заслуговує на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали».

### ОФІЦІЙНИЙ ОПОНЕНТ:

завідувач відділу радіаційної біофізики

Інституту прикладної фізики НАН України,

кандидат фізико-математичних наук,

старший науковий співробітник

С.М. Данильченко

*Сигнатура Данильченка С.М.*

*Зав. Відділу радіаційної біофізики – Ф.Ю. Кудель*

