

## ВІДГУК

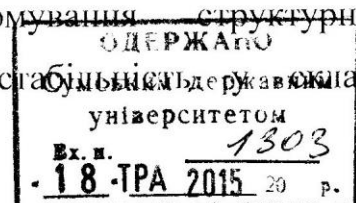
офіційного опонента на дисертаційну роботу  
Сергія Ігоровича Воробйова  
«Вплив процесів фазоутворення на магнітні і  
магніторезистивні властивості приладових структур  
на основі Fe (Co) та Gd»,  
поданої на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук  
за спеціальністю 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем

### Актуальність теми дисертації

Посищення нанорозмірних шарів на основі рідкоземельних (R) та перехідних (T) металів має перспективи широкого використання при виготовленні нових приладових структур, що пов'язане з особливостями взаємного антиферомагнітного впорядкування у R/T системах. Це впорядкування може реалізуватись при стабілізації аморфного (квазіаморфного) стану у шарах із R металів та дотриманням певних умов формування і параметрів плівкових зразків. У таких системах можуть бути отримані високі значення магнітних характеристик, але стабільність робочих параметрів елементів визначається при певній комбінації компонент та їх структурно-фазовим станом.

У більшості випадків магнітні властивості нанорозмірних плівкових систем на основі R/T металів, з парами Fe (Co) та Gd, досліджуються іншими авторами у складі більш складних багатошарових функціональних плівкових структур. Відомі роботи, у яких вивчалися лише температурні ефекти у магнітних характеристиках мультишарів [Gd/Fe]<sub>n</sub>. У меншій мірі відомі дослідження, де плівкові системи Fe (Co) та Gd розглядалися як самостійні функціональні елементи. Хоча, у всіх випадках головною метою робіт було дослідження магнітних та гальваноманітних властивостей плівкових систем на основі R/T металів лише з частковим аналізом їх структурних особливостей і фазового складу.

Таким чином, встановлення умов формування структурно-розупорядкованих фаз Gd, їх температурна стабільність є важливим



багатошарових плівкових систем Fe (Co)/Gd/Fe (Co) та вплив процесів фазоутворення на магнітні і магніторезистивні властивості визначає мету дисертаційної роботи С.І. Воробйова, яку можна досягти використовуючи лише комплексний підхід, що визначає актуальність даної роботи.

Робота виконувалася у рамках держбюджетних тематик Міністерства освіти і науки України та індивідуальних грантів державної програми МОН України на стажування у провідних закордонних ВНЗ і наукових установах (Університет Лотарингії, м. Нансі, Франція, 2013-2014 рр.).

### **Наукова новизна**

Аналізуючи роботу в цілому, слід відмітити, що при її виконанні було проведено комплексне дослідження фазового складу, кристалічної структури, магнітних і магніторезистивних властивостей тришарових плівок та мультишарів на основі Fe і Co та Gd. При цьому було експериментально отримано ряд нових наукових результатів, з яких, на наш погляд, найбільш вагомими є наступні:

1. Уперше встановлено взаємозв'язок магнітних та магніторезистивних властивостей матеріалів функціональних елементів на основі Fe (Co) і Gd із їх структурно-фазовим складом залежно від товщини окремих шарів і фрагментів та кількості повторювань. Автором роботи показано, що при збільшенні кількості фрагментів від 2 до 8 у мультишарах [Co/Gd] відбувається зростання величин коерцитивної сили та залишкової намагніченості і намагніченості насичення, що пов'язано з розмиттям інтерфейсів та збільшенням концентрації феромагнітної компоненти відповідно.

2. Уперше проведені дослідження впливу зміни кута орієнтації зразка у площині плівки під дією зовнішнього магнітного поля для мультишарів на основі Co та Gd після термообробки. Установлено, що після термообробки у мультишарах зберігається одновісна магнітна анізотропія, що свідчить про високу термічну стабільність магнітних властивостей і дозволяє розглядати такі системи, як матеріали для чутливих елементів датчиків положення.

3. Установлено, що при зміні ефективної товщини прошарку з

квазіаморфного-Gd у межах 1 – 10 нм та верхнього шару Fe (Co) у межах 1 – 5 нм величини магнітоопору та коерцитивної сили мають осцилюючий характер в усіх геометріях вимірювання, який зникає при переході Gd до кристалічного стану при  $d_{Gd} > 10$  нм.

4. Автором було показано, що модель анізотронії коерцитивної сили може бути використана для прогнозування значень величини коерцитивної сили матеріалів функціональних елементів на основі Fe (Co) і Gd при переході від паралельної до перпендикулярної геометрії вимірювання.

### **Достовірність результатів та ступінь обґрунтування наукових положень**

Достовірність отриманих у дисертаційній роботі результатів та ступінь обґрунтованості наукових положень і висновків забезпечується такими обставинами.

По-перше, використання сучасних методів досліджень магніторезистивних властивостей і магнітних характеристик, зокрема при використанні вібраційної і SQUID-магнітометрії.

По-друге, застосування при проведенні експериментів та для обробки результатів досліджень комп'ютерної техніки та відповідного програмного забезпечення. Це дозволяє збільшити точність реєстрації даних експерименту та обробляти великі масиви інформації з послідовним графічним представленням.

По-третє, систематичністю і повторюваністю отриманих результатів та їх відповідністю відомим літературним даним.

### **Практичне значення результатів роботи і рекомендації щодо їх використання**

У даній роботі автором було проведено комплексне дослідження структурно-фазового стану та його впливу на магнітні і магніторезистивні властивості тришарових плівок та мультишарів на основі Co і Fe та Gd. При цьому було показано, що в залежності від товщини пропарку із Gd його структурно-фазовий може змінюватися від квазіаморфного до кристалічного

з можливістю формування домішкових оксидних і гідридних фаз. Було встановлено, що на інтерфейсі R/T шарів можливе формування аморфного твердого розчину. Отримані фундаментальні результати поглиблюють уявлення про вплив процесів фазоутворення на магнітні і магніторезистивні властивості багатшарових плівкових систем.

Автором з'ясовано вплив на магнітоопір систем, їх коерцитивну силу, залишкову намагніченість і намагніченість насичення у залежності від товщини проширку з квазіаморфного Gd та товщин окремих шарів феромагнетиків. Показано, що плівки на основі R/T металів, зокрема з аморфними проширками, є досить перспективними з точки зору практичного використання їх як середовища для термомагнітного запису і зчитування інформації, у якому співвідношення між сигналом і шумом краще, ніж у полікристалічних зразках. Також, стабільність магнітних і магніторезистивних характеристик плівкових систем на основі R/T при зміні орієнтації зразків у зовнішньому магнітному полі дозволяє розглядати їх як перспективні матеріали для розробки і виготовлення чутливих елементів сенсорів магнітного поля.

### **Зауваження до роботи**

1. В одно- і тришарових плівках проявляється анізотропія магнітоопору, про що свідчать дані, які приведені на рис. 5.1, 5.2, 5.10. Вона проявляється у тому, що при перпендикулярній орієнтації магнітного поля до струму величина МО має додатній знак, а при паралельній – від'ємний. Поряд з цим з даних приведених на рис. 5.1 в, 5.1 г для плівок Co та 5.2 г і 5.10 г для плівок Co/Gd/Co при паралельній орієнтації магнітного поля і струму в околі нульового значення поля спостерігається зміна знака магнітоопору. У тексті роботи не описані фізичні причини цього явища.

2. З даних приведених на рис. 5.4 залежність величини магнітоопору від кута для тришарових плівок на основі Fe та ka-Gd на залежності спостерігається мінімум при значеннях кута  $\alpha = 60^\circ - 70^\circ$ , що не знайшло свого пояснення.

3. На рисунках 4.11 і 4.12 приведені петлі гістерезису намагніченості, які

отримані при різних орієнтаціях зразка з кроком у  $15^\circ$ , що значно ускладнює сприйняття результатів досліджень.

4. У дисертаційній роботі проводиться дуже багато даних експериментальних вимірювань, але не завжди проводиться аналіз отриманих результатів з обговоренням альтернативних моделей і тверджень. Наприклад, у багатьох тришарових сполуках з проміжним шаром гадолінію (4 розділ) автор спостерігає осцилюючу залежність коерцитивної сили від товщини цього проміжного шару, проте не розглядається механізм Родермана-Кіттеля, який може приводити до такого типу залежності.

5. При вимірюванні температурних залежностей провідності плівки на жаль не використовується чотирьох контактний метод. Тому твердження автора (ст. 85), що «характер температурної залежності опору і питомого опору буде однаковий» для його методики вимірювань не зовсім точний. При нагріві плівки геометрія і шлях проходження струму може змінюватись.

6. У роботі на жаль зустрічаються граматичні помилки і російськомовні терміни. Так українською мовою потрібно писати не «рідкоземельні метали», а рідкісноземельні метали; не «кристалічна решітка», а кристалічна ґратка; не «вітка кривих намагнічування», а гілка або ділянка і т.д.

Вказані зауваження в цілому не впливають на наукову цінність, одержаних у дисертаційній роботі результатів.

### **Загальний висновок**

Результати дисертації відображені у 15 публікаціях, у т.ч. семи статтях (із них 4 статті у журналах, що індексуються наукометричною базою Scopus) та 8 тезах доповідей. Текст автореферату повністю відповідає змісту дисертації.

Дисертація С.І. Воробйова є завершеною працею в якій отримані нові

науково-обґрунтовані результати, що мають фундаментальне і прикладне значення для плівкового матеріалознавства мікро- і наноселектроніки та сенсорики.

За актуальністю, новизною результатів, їх обсягом, достовірністю і обґрунтованістю та практичним значенням дисертаційна робота С.І. Воробйова відповідає встановленим вимогам до кандидатських дисертацій, зокрема пунктам 9, 11, 12 і 13 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», а її автор заслуговує на присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.01– фізика приладів, елементів і систем.

Офіційний опонент,

В.о. директора Інституту магнетизму

НАН та МОН України

член-кореспондент НАН та МОН України,

д. ф.-м. н., професор



Ю. І. Горобець