

Відгук

**офіційного опонента на дисертацію Шкурдоди Юрія Олексійовича
«Електрофізичні і магніторезистивні властивості несиметричних та
гранульованих систем в умовах протікання твердофазних реакцій»,
поданої на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук зі спеціальності
01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем**

Дослідження явищ, які пов'язані з електронним транспортом у нанорозмірних магнітонеоднорідних матеріалах, постійно знаходиться у полі зору науковців. Так, протягом останніх років спостерігається стійка тенденція до вивчення як у теоретичному, так і в експериментальному плані електрофізичних і магніторезистивних властивостей багатошарових та гранульованих структур із можливим спін-залежним розсіюванням і тунелюванням електронів. Цікавість до таких плівкових систем у першу чергу пов'язана з широким їх використанням як чутливих елементів датчиків магнітного поля, у цифрових пристроях магніторезистивної пам'яті, автомобільній електроніці, біомедичних технологіях та ін. На сьогодні проведено велику кількість досліджень, що стосуються отримання та вивчення магніторезистивних властивостей багатошарових плівок на основі Fe_xNi_{100-x} . Але у переважній більшості робіт досліджуються структури на основі феромагнітних сплавів $Fe_{20}Ni_{80}$ та $Fe_{50}Ni_{50}$ (пермалої). Практично відсутні роботи, де були б проведені дослідження фізичних властивостей багатошарових структур на основі Fe_xNi_{100-x} у широкому інтервалі концентрацій, отриманих в однакових умовах.

Також слід зазначити, що як на час постановки задач у рамках представленої дисертаційної роботи, так і на теперішній час виникає потреба в подальшому пошуку та експериментальному дослідженні плівкових структур, які б більш повно відповідали додатковим вимогам функціонального характеру (зменшення розмірів датчиків, збільшення їх чутливості, забезпечення відтворюваності параметрів тощо). Однією з основних вимог до таких структур є висока термостабільність їх електрофізичних і магнітних параметрів та прогнозованість поведінки електрофізичних та магніторезистивних властивостей багатошарових систем зі зміною температури.

Особливо перспективним напрямом у розвитку фізики приладових структур є дослідження тунельних структур «метал-діелектрик», що пов'язано з широкими можливостями їх практичного використання в різних пристроях твердотільної електроніки та спінтроніки (магнітні пристрої для

збільшення щільності пам'яті, датчики фізичних величин та інші елементи мікро- та наноелектроніки і спінтроніки).

З огляду на це тема дисертаційної роботи Шкурдоди Ю.О. є актуальною, оскільки в ній проведено комплексне дослідження структурно-фазового стану, магніторезистивних і магнітних властивостей тришарових плівкових систем на основі Co, Fe, сплаву Fe_xNi_{100-x} , і Cu та гранульованих структур «метал-діелектрик» у широкому інтервалі концентрацій і товщин. Дослідження проводились у рамках держбюджетних тем Міністерства освіти і науки України.

У дисертаційній роботі Ю.О. Шкурдоди розв'язано ряд фундаментальних і прикладних задач, які пов'язані з установами взаємозв'язку між структурно-фазовим та елементним складом і магніторезистивними та магнітними властивостями; дослідженням процесів формування твердих розчинів та інтерметалічних фаз; магнітотранспортними властивостями тощо.

Дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел. Робота викладена на 393 сторінках, містить 140 рисунків та 22 таблиці. Список використаних джерел містить 435 найменувань.

У вступі обґрунтовано актуальність теми і необхідність проведення досліджень, сформульовано мету та завдання роботи, показано її наукову новизну і її практичну цінність, наведені відомості про апробацію і публікацію основних положень.

У першому розділі проведено аналіз стану проблеми. Цитована література повністю відображає сучасний стан проблеми. У розділі міститься обґрунтований висновок про те, що плівкові магнітонеоднорідні матеріали на основі Fe, Co, сплаву Fe_xNi_{100-x} та Cu можуть бути функціональними елементами приладових структур із покращеними характеристиками і параметрами.

У другому розділі описана експериментальна техніка, викладені методи вакуумного термічного напилення багат шарових плівок та гранульованих структур «метал-діелектрик», описано режими температурної стабілізації плівок після їх конденсації, методика визначення товщини шарів, електронно-мікроскопічні методи визначення фазового і хімічного складу, розмірів острівців у наноструктурних системах, методики дослідження магніторезистивних та магнітних властивостей.

В роботі використовувалися добре опробовані діагностичні методи контролю параметрів тонких плівок, тому одержані експериментальні результати є надійними, відтворюваними і такими, що можуть бути співставлені з результатами інших авторів.

У третьому розділі наведені результати досліджень структурно-фазового складу свіжосконденсованих та відпалених при температурі 700 К одношарових плівок феромагнітних сплавів Fe_xNi_{100-x} і Co_xNi_{100-x} та тришарових плівкових систем на основі Co, Fe, сплаву Fe_xNi_{100-x} (F – шари) та Cu (N – шар), отриманих методом пошарової конденсації металів. Також представлені результати дослідження відносної концентрації компонент по глибині у тришарових плівкових матеріалах методом вторинно-іонної мас-спектрометрії (ВІМС).

Отримані дані щодо структурно-фазового складу тришарових плівок на основі феромагнітних металів Co, Fe і сплавів Fe_xNi_{100-x} є важливим із точки зору їх можливого використання як функціональних елементів приладових структур.

У четвертому розділі викладено результати досліджень магніторезистивних властивостей свіжосконденсованих та відпалених у магнітному полі за різних температур тришарових плівкових систем на основі Co, Fe, сплаву Fe_xNi_{100-x} та Cu. Показано, що для тришарових плівок $Fe_xNi_{100-x}/Cu/Fe_xNi_{100-x}/\Pi$ в інтервалі товщин шарів $d_F = 15 - 40$ нм та $d_N = 6 - 15$ нм із концентрацією нікеля $C_{Ni} \leq 90$ мас. % у магнітних шарах як у свіжосконденсованих, так і відпалених за температури 400 К реалізується спін-залежне розсіювання електронів. Відпалювання за температури 550 К призводить до зменшення величини ізотропного магнітоопору та появи анізотропії у плівках з концентрацією нікеля у магнітних шарах $C_{Ni} \geq 50$ ат.%. Встановлено, що максимальне значення ізотропного магнітоопору за кімнатної температури спостерігається для свіжосконденсованих тришарових плівкових систем $Fe_{50}Ni_{50}/Cu/Fe_{50}Ni_{50}$ із $d_F = 30$ нм та $d_N = 6$ нм. Зі зниженням температури зразків від 293 до 120 К величина їх ізотропного магнітоопору збільшується в 1,3 – 2,2 рази залежно від концентрації компонент у магнітних шарах.

Одержані аналітичні співвідношення для розрахунку амплітуди ефекту гігантського магнітоопору дозволяють прогнозувати поведінку величини ГМО зі зміною товщини покривного магнітного шару в тришаровій плівці, що має важливе значення при отриманні нових матеріалів з оптимізованими магніторезистивними параметрами для сучасної спінтроніки та електроніки.

У п'ятому розділі наведені дані дослідження про розмірні, концентраційні і температурні залежності коерцитивної сили та поля насичення свіжосконденсованих і термостабілізованих при температурі 700 К тришарових плівок на основі Fe_xNi_{100-x} , Co та Cu і представлені результати дослідження впливу процесів перемагнічування тришарових плівок на основі Fe_xNi_{100-x} та Cu на польові залежності магнітоопору.

У шостому розділі наведено результати дослідження магніторезистивних властивостей свіжосконденсованих та відпалених при температурі 700 К структурно-несуцільних плівок феромагнітних металів і сплавів на їх основі. Встановлено, що для свіжосконденсованих плівок Co ефективною товщиною ($d_{Co} = 5 - 25$ нм) та Fe ($d_{Fe} = 10 - 30$ нм) спостерігаються ізотропні польові залежності. Показано, що максимальні значення ізотропного магнітоопору спостерігаються в тому випадку, коли розмір острівців складає 3–5 нм, а ширина діелектричного бар'єру між ними 1–3 нм. Для відпалених при температурі 700 К плівок максимальні значення негативного ізотропного магнітоопору спостерігаються за ширини діелектричного бар'єру 2–5 нм.

Аналізуючи дисертаційну роботу в цілому, слід відзначити отримані найбільш вагомими, на мій погляд наступні наукові результати.

1. Встановлено, що фазовий склад плівок із товщинами шарів $d_F = 10 - 50$ нм і $d_N = 5 - 20$ нм та концентрацією нікеля у магнітних шарах $C_{Ni} = 60 - 80\%$ відповідає ГЦК фазам Ni_3Fe ($a = 0,355 - 0,358$ нм) та ГЦК-Cu. Плівки із $C_{Ni} = 40 - 50\%$ також мають двофазний склад ГЦК-NiFe ($a = 0,358 - 0,362$ нм) та ГЦК-Cu. Після відпалювання таких плівок при температурі 700 К у даних системах утворюються тверді розчини (Ni_3Fe, Cu) та ($NiFe, Cu$) відповідно. Для зразків із $C_{Ni} < 40\%$ фазовий склад як свіжосконденсованих, так і відпалених при температурі 700 К тришарових зразків відповідає ОЦК-(Fe-Ni) + ГЦК-Cu.

2. Уперше показано, що в інтервалі товщин шарів $d_N = 5 - 15$ нм та $d_F = 25 - 40$ нм ($C_{Ni} < 90\%$) для свіжосконденсованих тришарових плівок на основі Co, Fe, Fe_xNi_{100-x} та Cu реалізується спін-залежне розсіювання електронів. Максимальне значення ізотропного магнітоопору за кімнатної температури спостерігається для тришарових плівок $Fe_{50}Ni_{50}/Cu/Fe_{50}Ni_{50}$ із $d_F \approx 30$ нм та $d_N \approx 6$ нм, що відповідає мінімальній концентрації Ni у магнітних шарах, за якої їх фазовий склад відповідає ГЦК-FeNi + ГЦК-Cu.

3. Експериментальні й теоретичні дослідження залежності величини ефекту анізотропного гігантського магнітоопору (АГМО) від товщини d_{m2} покриваючого магнітного шару (розмірної залежності) показує, що для граничних значень товщин d_{m2} покриваючого магнітного шару, порівняно з товщиною d_{m1} базового магнітного шару, ефект гігантського магнітоопору мізерно малий внаслідок наявності шунтуючого ефекту. У випадку, коли товщини магнітних шарів тришарового провідника сумірні за величиною ($d_{m2} \sim d_{m1}$), шунтуючий ефект зникає й ефект АГМО досягає свого максимального значення. Експериментально визначені амплітудні значення для поздовжнього та поперечного АГМО й отриманий аналітичний вираз для

параметра асиметрії α_{1j} , який характеризує відмінність довжин вільного пробігу електронів у спінових каналах провідності.

4. Уперше показано, що магніторезистивні властивості структурно-несуцільних плівок феромагнітних металів та сплавів (Fe, Co, $\text{Fe}_x\text{Ni}_{100-x}$ і $\text{Co}_x\text{Ni}_{100-x}$) визначаються їх ефективною товщиною і морфологією. Для плівок з $d = 3 - 10$ нм електропровідність є термічно активованою і реалізується негативний ізотропний магнітоопір. Відпалювання плівок із $d = 20 - 30$ нм призводить до появи анізотропії магнітоопору. Максимальне значення негативного ізотропного магнітоопору складає 1 % для свіжосконденсованих плівок Fe, що дозволяє розглядати їх як перспективні матеріали для розробки функціональних елементів для детектування магнітних полів у діапазоні 0,1–1 Тл.

Достовірність отриманих у дисертаційній роботі результатів та ступінь обґрунтованості наукових положень і висновків забезпечується такими положеннями. По-перше, автором коректно була вибрана методика отримання тришарових плівок. По-друге, для вивчення фазового складу, кристалічної структури й елементного складу плівкових зразків були використані сучасні методики, поширені для вирішення подібних задач. По-третє, отримані експериментальні значення питомого опору та гігантського магнітоопору добре узгоджуються з розрахунковими.

Крім цього, автор дисертації коректно та відповідально підійшов до методики проведення експериментальних досліджень. Зокрема, спеціально було виготовлено відповідне обладнання для термообробки плівок в умовах безмасляного надвисокого вакууму в постійному магнітному полі.

Отримані у роботі результати можуть бути використані у лабораторіях плівкового матеріалознавства дослідницьких установ НАН України та закладів вищої освіти МОН України. Зокрема, співвідношення для розрахунку величини гігантського магнітоопору може бути застосоване при прогнозуванні його величини для тришарових плівок зі спін-залежним розсіюванням електронів. «Псевдоспін-вентильні» структури $\text{Fe}_x\text{Ni}_{100-x}/\text{Cu}/\text{Co}/\text{П}$ ($x > 10$, $d_F = 20 - 40$ нм, $d_N = 5 - 10$ нм) можуть бути використані у прикладних розробках при створенні функціональних елементів датчиків магнітного поля.

Створене при виконанні даної дисертації експериментальне обладнання і розроблені методики вже використовуються в науково-дослідній роботі

аспірантів і студентів та у лабораторних практикумах у Сумському державному університеті.

Зауваження до роботи

1. Недостатньо детально обгрунтовано вибір для дослідження тришарових плівок з відносно товстими магнітними та немагнітними шарами, коли з літературних джерел, що стосуються багат шарових систем Ni-Fe/Cu та ін., відомо, що ГМО зменшується при суттєвому збільшенні товщини шарів.

2. Необхідно було б обгрунтувати невеликий температурний інтервал (120-700 К), у якому проводилися дослідження електропровідності і магніторезистивних властивостей, а також відсутність досліджень перпендикулярного магнітоопору.

3. При узагальненні результатів електронно-мікроскопічних, електроннографічних та мас-спектрометричних досліджень дисертант запропонував структурні моделі лише для свіжосконденсованих та відпалених при температурі 700 К тришарових плівок на основі Fe_xNi_{100-x} та міді.

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

5. Варто було б більш детально обговорити проблему часової стабільності функціональних елементів зі спін-залежним розсіюванням електронів.

Однак указані зауваження не мають суттєвого впливу на загалом високий рівень отриманих наукових результатів і їх практичну значимість.

Загальний висновок

Дисертація Шкурдои Ю.О. є завершеною науково-дослідною роботою, в якій отримані нові науково-обгрунтовані експериментальні результати, що дозволяють вирішити питання, пов'язані з процесами формування магнітонеоднорідних функціональних матеріалів та їх магніторезистивними і магнітними властивостями для застосування при створенні нових перспективних елементів і пристроїв мікроелектроніки.

Результати наукових досліджень автора повністю висвітлені у наукових публікаціях, автореферат адекватно відображає зміст дисертаційної роботи.

Таким чином, за актуальністю теми, новизною отриманих результатів, їх достовірністю та обгрунтованістю, обсягом, науковим і практичним значенням дисертаційна робота Шкурдои Ю.О. «Електрофізичні і магніторезистивні

властивості несиметричних та гранульованих систем в умовах протікання твердофазних реакцій» цілком відповідає вимогам "Порядку присудження наукових ступенів", а її автор Шкурдода Юрій Олексійович, заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем.

Офіційний опонент,
директор Міжвідомчого науково-навчального фізико-технічного центру МОН і НАН України при Одеському національному університеті імені І. І. Мечникова,
заслужений діяч науки і техніки України,
д-р. фіз.-мат. наук, професор

Я. І. Лепіх

Підпис Я. І. Лепіха засвідчую
Вчений секретар
к.х.н., доц.

07.09.18



С.В. Курандо