

Відгук

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

Актуальність теми дисертації

Дисертаційна робота Шкурдоди Ю.О. є завершеною науковою працею та представляє комплексне систематичне дослідження структурно-фазового стану конденсованих нанорозмірних матеріалів функціонального призначення на основі феромагнітних шарів – Co, Fe, Fe_xNi_{100-x}, розділених прошарками Cu, а також електрофізичних, магнітних та магніторезистивних характеристик (питомий електроопір, коерцитивна сила, поле насичення, магнітоопір тощо) та впливу на них умов конденсації, термобробки, розмірних та концентраційних ефектів. Тема роботи є актуальною з огляду на наступні обставини.

На сучасному етапі розвитку плівкового матеріалознавства подальше поглиблення знань у галузі фізики плівкових приладових структур відбувається у напрямі досліджень магнітно неоднорідних матеріалів на основі шарів з дисперсною структурою – аморфних, нано- та мікрокристалічних плівок. Саме у магнітно неоднорідних плівкових матеріалах були відкриті такі фундаментальні ефекти як осцилююча обмінна взаємодія, ефекти гігантського і тунельного магнітоопору. На основі зазначених ефектів було розроблено велику кількість приладових структур у вигляді металічних багатошарових систем різного функціонального призначення, зокрема, запам'ятовуючі пристрої нового покоління. Незважаючи на те, що на час постановки задач у рамках представленої дисертаційної роботи зазначені системи вже використовувалися у приладах спінтроніки, у теперішній час триває активний пошук та дослідження нових функціональних наноструктурованих плівкових матеріалів із спін-залежним розсіюванням електронів із покращеними робочими характеристиками і параметрами.

Отже, дослідження структурних характеристик, магніторезистивних та електрофізичних властивостей феромагнітних плівок із немагнітними



прошарками є досить актуальними. Актуальність теми дисертації Ю.О. Шкурдоди підтверджується також тим фактом, що вона виконувалась, починаючи з 2008 р., у рамках держбюджетних тем, які фінансувалися Міністерством освіти і науки України.

Загальна характеристика роботи

За своїм змістом дисертаційна робота Ю.О. Шкурдоди є комплексом експериментальних досліджень, які також супроводжуються теоретичними розрахунками. У *першому розділі*, що є літературним оглядом, здійснено глибокий та критичний аналіз наявних результатів за темою дисертаційної роботи. На основі такого аналізу і були сформульовані напрями подальших досліджень.

У *другому розділі* описані методи, методики та приладова база для виготовлення і дослідження плівкових зразків. Технологічні прийоми виготовлення плівок і плівкових багатошарових систем у високому вакуумі (тиск залишкових газів порядку 10^{-4} Па) за допомогою електронно-променевої та резистивних вольфрамових випарників забезпечували задовільну відтворюваність їх елементного складу, структури та фізичних властивостей. Значна увага приділяється опису оригінальних пристроїв. Особливої уваги заслуговує оригінальна установка для проведення термомагнітної обробки зразків та вимірювань їх магнітоопору в полях до 0,2 Тл в умовах надвисокого безмасляного вакуума (тиск до 10^{-7} Па). Для вивчення структури, елементного складу, рельєфу поверхні зразків використовувалися сучасні методи досліджень, такі як просвітлювальна електронна мікроскопія, дифракція електронів, вторинно-іонна мас-спектрометрія, рентгеноспектральний мікроаналіз, атомно-силова мікроскопія тощо. Для визначення магнітних параметрів (коерцитивна сила, поле насичення) застосовувалися як методи прямого (магнітостатичні вимірювання), так і непрямого вимірювання (магніторезистивні вимірювання).

У *третьому розділі* «Кристалічна структура, фазовий та елементний склад плівкових зразків» наведено експериментальні результати стосовно елементного та фазового складу, дифузійних процесів, а також дослідження топології поверхонь одержаних плівок сплавів та багатошарових структур. На основі отриманих результатів встановлено умови стабілізації твердих розчинів та зроблено висновок, що фазовий склад тришарових плівок на основі

феромагнітних металів Co, Fe і сплавів Fe_xNi_{100-x} ($x > 60\%$) із прошарком Cu суттєво не змінюється в процесі термооброблення за температури 700 К, що є важливим із точки зору їх можливого прикладного використання.

У *четвертому розділі* розглянуто коло питань, пов'язаних із експериментальними і теоретичними дослідженнями електропровідності та магніторезистивних властивостей тришарових плівкових матеріалів з можливим спін-залежним розсіюванням електронів. Зокрема, наведено дані стосовно впливу на вид польових залежностей та величину магнітоопору товщини магнітних і немагнітних шарів, елементного складу магнітних шарів, температури підкладки й температури вимірювання, умов термообробки тощо. Наведено результати експериментального і теоретичного (з використанням резисторної та двострумкової моделей) дослідження ефекту гігантського магнітоопору (ГМО) в тришарових плівках на основі Co і Cu та запропонована методика розрахунку параметрів спін-поляризованого транспорту електронів у тришарових плівках за результатами експериментального дослідження розмірної залежності магніторезистивного відношення від товщини верхнього магнітного шару. Представлено результати дослідження анізотропії ефекту ГМО в тришарових магнітних плівках, а також встановлено характер зміни магнітоопору зі зміною товщини верхнього магнітного шару, виявлено умови, за яких спостерігається максимальне значення зазначеного ефекту, та наведено методику розрахунку параметра, що характеризує відмінність довжини вільного пробігу електронів із різною спіновою поляризацією.

У останньому підрозділі узагальнено результати стосовно можливого практичного застосування досліджених плівкових матеріалів із спін-залежним розсіюванням електронів як чутливих елементів сенсорних та інформаційних приладів різного функціонального призначення.

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

У *шостому розділі* проведено аналіз температурних залежностей питомого електричного опору від ефективної товщини структурно-несуцільних плівок, наведено результати магніторезистивних досліджень структурно-несуцільних плівок феромагнітних металів і сплавів на їх основі та гранульованих структур на основі Co та SiO_x .

На основі результатів, наведених у розділах 3-6, можна сформулювати положення, які визначають наукову новизну дисертації. Доцільно розглянути найважливіші з них:

Наукова новизна

1. Досліджено вплив параметрів плівкових матеріалів (товщин феромагнітних плівок та немагнітних прошарків, їх структури, що формується в процесі різних умов виготовлення (температура підкладки) та відпалювання) на особливості магніторезистивного ефекту та переходу від систем з ефектом гігантського магнітоопору до систем з анізотропним характером магнітоопору (АМО), властивого однорідним феромагнетикам. Встановлено оптимальні режими виготовлення плівкових матеріалів які можуть бути використані у прикладних розробках при створенні функціональних елементів датчиків.

2. Уперше встановлено, що для плівок системи Co/Cu/Fe, які отримані за температури підкладки при конденсації 400 К (з проявом анізотропного магнітоопору у вихідному стані), після відпалювання при 550 К відбувається перехід до ГМО. Зазвичай, внаслідок втрати індивідуальності немагнітного прошарку при відпалюванні та виникнення внаслідок цього обмінної взаємодії між феромагнітними шарами, ефект ГМО подавляється.

3. Уперше на основі дослідження впливу анізотропного магнітоопору на величину гігантського магнітоопору у тришарових полікристалічних плівкових системах показано, що у разі, якщо вектор густини струму та вектор намагніченості у феромагнітних шарах збігаються за напрямком, урахування анізотропії магнітоопору приводить до зменшення величини ефекту ГМО, тоді як у випадку, якщо зазначені вектори є взаємно перпендикулярними в площині плівки, величина ефекту ГМО збільшується.

4. Установлено, що для структурно-несуцільних плівок Co та Fe спостерігаються ізотропні польові залежності магнітоопору. Максимальна величина ізотропного магнітоопору ($MO = 1\%$) спостерігається для свіжосконденсованих плівок Fe з розміром острівців 3–5 нм і шириною вакуумного зазору між ними 1–2 нм.

5. Уперше показано, що в гранульованих плівках на основі Co та SiO_x з часткою Co близько 50 % і товщиною близько 30 нм реалізується за кімнатної температури від'ємний ізотропний магнітоопір величиною 2,5 %, що дозволяє

розглядати їх як перспективні матеріали для розробки функціональних елементів для детектування магнітних полів у діапазоні 0,1–1 Тл.

Достовірність результатів та ступінь обґрунтованості наукових положень

Достовірність результатів, які одержав дисертант, обґрунтовується наступним:

1. Коректно підібраними умовами осадження та контролю плівкових зразків у методі термічного вакуумного напилення.

2. Використанням сучасних методик дослідження (електронна мікроскопія та електронографія, прямі магнітостатичні вимірювання, атомно-силова мікроскопія тощо).

3. Узгодженням експериментальних результатів та розрахункових моделей з сучасними уявленнями про структуру, електро- та магніторезистивні властивості плівкових систем.

4. Комплексним підходом до аналізу особливостей електрофізичних та магніторезистивних властивостей плівкових систем з урахуванням інформації про їх структурно-фазовий стан та дифузійні процеси.

5. Достатнім рівнем апробації та високим статусом наукових видань, в яких висвітлено результати роботи.

Отже, дисертаційна робота Ю.О. Шкурдоди за своїм змістом є комплексною, оскільки в ній застосовувались різноманітні експериментальні методики і розрахунково-теоретичні моделі. Саме комплексний характер роботи є основним чинником, що свідчить про достовірність здобутих у дисертаційній роботі результатів.

Практичне значення результатів роботи і рекомендації щодо їх використання

Результати, отримані в дисертаційній роботі, можуть бути використані як у фундаментальних, так і прикладних дослідженнях та розробках функціональних елементів. Розроблені в рамках цієї роботи теоретичні моделі ефекту ГМО поглиблюють уявлення про особливості електронного транспорту

в магнітних структурах і можуть бути використані при прогнозуванні магніторезистивних властивостей.

Дані про вплив температур нагрівання-охолодження та відпалювання на електрофізичні властивості плівкових систем, можуть бути використані у дослідженнях питань стабільності наноструктурованих матеріалів і елементів на їх основі.

Запропоновані симетричні «псевдоспін-вентильні» структури повинні знайти впровадження у прикладних розробках функціональних елементів детекторів магнітних полів.

Особливий інтерес для подальших самостійних досліджень представляють результати вивчення магніторезистивних властивостей гранульованих плівок «ферромагнітний метал – діелектрик» у яких за кімнатної температури реалізується негативний ізотропний магнітоопір величиною 2,5 %.

Одержані в роботі наукові і практичні результати можуть бути використані в Інституті магнетизму НАН України та МОН України, Інституті металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України, Фізико-технічному інституті низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України, у ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України, в Інституті радіофізики та електроніки НАН України, у Харківському Національному університеті ім. В.Н. Каразіна, у Національному технічному університеті «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» та в інших закладах, де здійснюється дослідження та використання у прикладних розробках функціональних елементів приладових структур.

Зауваження до роботи

Однак робота, на мою думку, має деякі недоліки.

1. Розглядаючи вплив температури підкладки при конденсації на структурні характеристики та фізичні властивості плівок, здобувачем не вказано чи змінюється швидкість конденсації металів при підвищенні температури підкладки (і якщо змінюється, то як).

2. Твердження автора «наявність горизонтальної ділянки на петлі свідчить про роздільне перемагнічування шарів» (стор. 197 – 198 дисертації)

недостатньо обґрунтоване. Горизонтальна ділянка на магніторезистивних петлях може бути пояснена 180° -ним зміщенням доменних стінок.

3. Твердження автора «У багатошарових магнітних плівках, у яких як магнітна компонента вибирається сплав пермалою, вважається, що домінуючим механізмом, який зумовлює ефект гігантського магнітоопору, є об'ємне спін-залежне розсіювання електронів» (стор. 247 дисертації) є не зовсім коректним. Справа в тому, що для геометрії «струм в площині плівки» внесок в гігантський магнітоопір роблять лише ті електрони, які мають можливість переходити з одного магнітного шару в інший (через немагнітний прошарок), залишаючи при цьому орієнтацію спіна незмінною. Найбільшу ймовірність таких переходів мають електрони, що знаходяться в ферромагнітному шарі на такій відстані від міжшарової межі розділу (міжшарового інтерфейсу), яка не перевищує певного значення, співрозмірного з довжиною вільного пробігу електронів. За таких умов домінуючим зазвичай є внесок від спін-залежного розсіювання *в області міжшарового інтерфейсу*, а не від розсіювання *в об'ємі магнітних шарів*.

4. Автор наводить цікаву методику розрахунку параметрів спін-поляризованого транспорту електронів у тришарових плівках і з використанням експериментально отриманого амплітудного значення магнітоопору отримує їх числові значення. Однак, у роботі не зроблено порівняння цих параметрів з відповідними значеннями з інших літературних джерел. Також, на мою думку, автору слід було б детальніше проаналізувати умови та межі застосовності рівняння, яке лежить в основі вказаних розрахунків (вираз (4.7), стор. 237 дисертації).

5. У тексті дисертації зустрічаються граматичні та стилістичні помилки, зокрема, в деяких місцях відсутні або зайві розділові знаки, неправильне написання деяких слів (наприклад, декілька разів зустрічається вираз «мінітарних» замість «міноритарних», і т.п.), некоректна побудова речень.

Однак, наведені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Загальний висновок

Результати наукових досліджень автора достатньо повно викладені у фахових виданнях, що входять до відповідного переліку. Автореферат і опубліковані роботи достатньо повно відображають основний зміст

дисертаційної роботи. Дисертація Шкурдоди Ю.О. є завершеною науково-дослідною роботою, у якій отримано нові науково-обґрунтовані результати, які в сукупності є суттєвими для розвитку фізики магнітно неоднорідних функціональних матеріалів і плівкового матеріалознавства та можуть бути використані у подальших прикладних дослідженнях та розробках плівкових функціональних елементів – резисторів, датчиків магнітного поля тощо.

Таким чином, за актуальністю тематики, за новизною отриманих результатів, їх обсягом, достовірністю та обґрунтованістю, науковим і практичним значенням розглянута дисертаційна робота «Електрофізичні і магніторезистивні властивості несиметричних та гранульованих систем в умовах протікання твердофазних реакцій» цілком відповідає вимогам ДАК МОН України щодо докторських дисертацій, зокрема пунктам 9, 10, 12 та 13 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника» затвердженого постановою Кабінетів Міністрів України від 24.07.2013 р. № 569 із змінами (окрім п. 3), що внесені до постанов Кабміну України, затвердженими постановою Кабміну України від 12.09.2011 р. № 955, 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,
завідувач відділу фізики плівок
Інституту магнетизму НАН України та МОН України,

д-р. фіз.-мат. наук, професор

О.І. Товстолиткін

Підпис О.І. Товстолиткіна засвідчують
Вчений секретар
Інституту магнетизму НАН України та МОН України



канд. фіз.-мат. наук

А.О. Хребтов