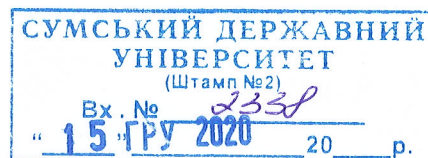


## ВІДГУК

офіційного опонента  
на дисертацію Шумакової Марини Олегівни  
«Електрофізичні та магніторезистивні властивості плівкових матеріалів  
на основі феромагнітних і благородних металів»,  
яка подана на захист до разової спеціалізованої вченої Ради  
ДФ 55.051.004 Сумського державного університету, що утворена МОН  
України від 09.11.2020 р. №1392 для розгляду та проведення разового захисту  
дисертації на здобуття наукового ступеня доктора філософії  
з галузі знань 10 «Природничі науки»  
за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали»

*Актуальність теми дослідження* пов'язана із вивченням електрофізичних і магніторезистивних властивостей гранульованих плівкових сплавів, які знайшли своє застосування у таких галузях електроніки як спінтроніка та наноелектроніка. Проведені дослідження у більшій мірі мають фундаментальний характер, хоча у роботі також акцентується увага на прикладних аспектах проблеми. Суть проведених досліджень полягає в установленні фізичних причин і умов реалізації дуже малих величин магнітоопору і термічного коефіцієнту опору (мова іде про величини магнетоопору (МО) порядку  $10^{-1} \div 10^{-2} \%$  і температурного коефіцієнту опору (ТКО) порядку  $10^{-3} \text{ K}^{-1}$ ) в гранульованих плівкових сплавах на основі атомів Ag або Au та Fe або Co. Слід зазначити, що такі малі значення МО і ТКО спостерігаються як при низьких, так і підвищених температурах і до великої міри є типовими значеннями для гранульованих плівкових сплавів. Зрозуміло, що це може бути обумовлено різними факторами, зокрема товщиною зразків, розмірами гранул, наявності парамагнітної компоненти, режимів термообробки і т.п. У дисертації Шумакової М.О. проведено систематичне дослідження впливу таких двох факторів: 1) розчинення атомів залишкової атмосфери у гратці твердого розчину (т.р.) (технологічний фактор); 2) залежність МО і ТКО від спіну магнітних гранул (пов'язано із фізикою явища). Із використанням методів мікроаналізу, електронної мікроскопії, електронографії та спектроскопії Венда, були отримані результати, на основі яких зроблений



висновок відносно ролі атомів домішок у процесі електроперенесення, що можна трактувати як вирішення актуальної задачі прикладного характеру. Проведені розрахунки величини спінів магнітних гранул і з'ясування їх впливу на ГМО і ТКО також можна розглядати як вирішення актуальної задачі фізики кінетичних явищ у нанокристалічних і нанорозмірних матеріалах.

З такої точки зору мета роботи є аргументованою, оскільки направлена на встановлення фізичних причин реалізації аномально малих величин МО і ТКО у гранульованих плівкових сплавах.

*Загальна характеристика дисертаційної роботи.* Робота виконана на кафедрі електроніки, загальної та прикладної фізики Сумського державного університету і має зв'язок із держбюджетною тематикою. Основні результати дисертантом були отримані у процесі виконання науково-дослідних робіт МОН України: «Вплив процесів гранулізації і спін-залежного розсіювання електронів на фізичні властивості плівкових твердих розчинів» (2015 – 2017 рр.) №0115U000689; «Термостабільні металеві спін-клапани для реалізації спінових клапанів в компонентах гнучкої сенсорної електроніки» (2017 – 2020 рр.) №0117U003925. Окрім того, роботу було підтримано Грантом Польської академії наук для участі у роботі LIX Школи з фізики (м. Закопане, 2019 р.).

Дисертаційна робота має класичну схему і складається із анотації, вступу, чотирьох розділів, зміст яких традиційний, висновків та списку використаних джерел.

*Найважливіші наукові результати, що містяться в дисертації, та нові факти отримані дисертантом.* Розв'язок задач, поставлених у роботі Шумакової М.О., дозволило отримати ряд нових принципових результатів.

1. Вперше високоточним методом ЕДС та допоміжним методом електронографії визначена максимально можлива концентрація кисню, азоту і вуглецю у плівкових матеріалах на основі Fe або Co і Ag або Au, отриманих у вакуумі  $10^{-4}$  Па методом одночасної або пошарової конденсації та у вигляді квазігранульованих плівок. У плівках на підкладці  $\text{SiO}_x/\text{Si}$  ( $\text{SiO}_x$  – природно окислений шар із  $x \approx 2$ ) максимальний вміст складає для атомів кисню до 2 ат.%,

для атомів вуглецю до 1 ат.%, а атоми азоту практично відсутні у плівках (вміст близько 0%).

2. Аналіз літературних даних і отриманих результатів стосовно електрофізичних властивостей плівкових т.р. дозволяє зробити висновок, що слабка залежність ТКО від концентрації магнітної компоненти пов'язана із незначним впливом магнітних гранул на кінетичні властивості т.р.; виключення гранул із механізму електроперенесення пояснено слабким ефективним розсіюванням електронів на поверхні гранул та реалізацією балістичного механізму провідності в їх об'ємі.

3. З метою пояснення причини реалізації у гранульованих плівкових т.р. загальної товщини до 70 нм аномально малих величин ГМО (від 0,01 до 0,40 %) у всіх трьох геометріях вимірювань МО були проведені наступні дослідження:

- вперше розроблена і апробована напівкласична модель для магнітоопору розбавлених плівкових т.р., в якій враховується залежність від магнітного поля не тільки СДВП, але і коефіцієнтів дзеркальності і проходження межі зерен та інтерфейсів при їх повному або частковому збереженні;

- у рамках класичної моделі М. Csontos et all. здійснений розрахунок магнітного  $\beta_{mB}$  і термічного  $\beta_{mT}$  коефіцієнтів питомого магнітного опору при різних середніх значеннях магнітних моментів (спінів) гранул ( $S=1-100$ ) та проведено порівняння із найбільш коректно оціненими величинами  $\beta_{mB}$  і  $\beta_{mT}$  на основі експериментальних залежностей загального питомого опору від індукції магнітного поля або температури.

4. Зроблено висновок, що причиною реалізації відносно малих величин ТКО (менше  $5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ ) та аномально малих величин ГМО є неефективне СЗРЕ на недосконалій системі гранул: більшість із них знаходяться у суперпарамагнітному стані, містять в собі атоми парамагнетика та при відносно великих розмірах будуть знаходитися у багатодоменному стані, що обумовить в останньому випадку не СЗРЕ, а звичайне електрон-магنونне; в наслідок цього реалізується низькоомний і високоомний спіновий канали та високоомний

омічний канал провідності твердого розчину, що в результаті і обумовлює аномально малі величини ГМО.

Поряд із цим можна вказати, що проведений на феноменологічному рівні аналіз температурної і концентраційної залежності анізотропного МО має також нетривіальний характер.

*Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків, рекомендацій, сформульованих у дисертації.* Оскільки робота Шумакової М.О. має експериментальний характер, то достовірність отриманих результатів гарантується використанням сучасних та апробованих методів фазового і елементного аналізу плівок, високоточного вимірювання їх товщини, електрофізичних та магніторезистивних характеристик. Крім того, на користь висновку про коректність отриманих експериментальних результатів свідчить їх узгодженість із відомими в літературі даними інших авторів. Коректність теоретичних розрахунків гарантується використанням апробованих напівкласичної та класичної моделей Бриллюена. Все це дозволяє стверджувати про достатню обґрунтованість наукових положень і висновків, сформульованих у дисертації.

*Апробація дисертації та публікації.* Основні положення роботи викладено та обговорено на наукових конференціях різного рівня: Міжнародна науково-технічна конференція студентів та молодих вчених «Фізика, електроніка, електротехніка» (м. Суми, 2020); International Symposium LIV Zakopane School of Physics (Zakopane, Poland, 2019); XVII International Freik Conference on Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems (Ivano-Frankivs'k, 2019); 9-th International Conference on Nanomaterials, Applications and Properties (Odesa, 2019); International Research and Practical Conference «Nanotechnology and Nanomaterials NANO-2016 (Lviv, 2016); International Conference Nanomaterials: Applications and Properties (Lviv, 2015); Міжнародна наукова конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики «ЕВРИКА-2014» (Львів, 2014).

Результати дисертації опубліковані у 14 працях, серед яких 7 статей, у т.ч. 5 статей, що обліковуються наукометричною базою Scopus, та відносяться до фахових видань України і 7 тез доповідей та 2 статей, які додатково відображають результати дисертаційної роботи.

**Оформлення дисертації** відповідає вимогам до такого виду робіт і наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

**Значення для науки і практики отриманих результатів.** Отримані у роботі результати можуть бути використані у лабораторіях плівкового матеріалознавства закладів вищої освіти МОН України та у дослідницьких установах НАН України. Зокрема, результати елементного аналізу плівок дозволяють гарантувати технологічну чистоту (концентрація легких атомів менше 3 ат. %) плівкових наногранульованих сплавів на основі Ag або Au та Fe або Co. Запропоновані у роботі феноменологічні моделі для термічних коефіцієнтів ГМО і АМО дозволяють у режимі експрес-методу прогнозувати температурну залежність ГМО і АМО. Крім того, запропонована напівкласична модель для магнітного коефіцієнту опору твердих розчинів дозволяє провести розрахунки спінів гранул, що знайде своє застосування у спінтроніці. Установлення фізичних причин відносно малих і аномально малих величин ТКО і ГМО відкриває можливість цілеспрямовано керувати електрофізичними та магніторезистивними властивостями гранульованих плівкових сплавів.

Крім цього, результати, отримані в роботі, можуть бути використані в учбовому процесі при підготовці спеціалістів різних кваліфікацій.

**Оцінка змісту дисертації та її завершеності.** Дисертація Шумакової М.О. є завершеною науково-дослідною роботою, в якій отримані нові результати стосовно елементного складу гранульованих плівкових сплавів на основі атомів Ag або Au та Fe або Co і, зокрема, домішкових атомів із залишкової атмосфери. Запропонована дисертантом напівкласична модель для магнітного коефіцієнту опору і використана класична модель Бриллюена, дозволили здійснити розрахунок середньої величини магнітного спіну гранули

у випадку аномально малих величин ГМО і ТКО. Це дозволило зрозуміти причину стабілізації вказаних аномальних величин.

Результати досліджень дисертанта повністю висвітлені у наукових журнальних публікаціях і матеріалах конференцій та відображені у змісті дисертації.

*Дискусійні положення та зауваження до змісту дисертації.*

По тексту дисертації можна зробити наступні зауваження.

1. Співвідношення (2.1), отримане дисертантом досить важливе, проте його практичне використання має проблему пов'язану з відсутністю алгоритму розрахунку або вимірювання ефективної товщини шару із атомів якого формується твердий розчин із системою магнітних гранул (у позначеннях дисертанта  $d_1^{\square}$ ).
2. При дослідженні кінетичних властивостей плівкових сплавів використовувалися масивні підкладки Si із природньо окисленим шаром  $SiO_x$  товщиною до 70 нм. У зв'язку з цим залишається не зрозумілим, чому при такій великій концентрації атомів кисню у шарі  $SiO_x$  у плівку дифундує дуже незначна їх кількість – до 2 ат.% ?
3. Методика розрахунків питомого магнітного опору, яка запропонована дисертантом, як і методика Ксонтоса та ін., мають суттєвий недолік, оскільки в основі них лежить різниця між експериментальною величиною ТКО або питомого магнітного опору гранульованого плівкового сплаву і розрахунковою величиною ТКО твердого розчину на основі напівкласичної моделі або питомого опору матриці на основі теорії Дебая-Грюнайзена. Неточність розрахункових величин може дуже суттєво вплинути на ТКО або на питомий магнітний опір, а, значить, і на величину спіну магнітних гранул. Більш коректно було б визначати вказану різницю експериментальним шляхом.
4. Необхідно вказати на низьку якість рисунка 3.15.

Проте, наведені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи Шумакової М.О.

Якщо зробити висновок в цілому, то можна стверджувати, що дисертація Шумакової М.О. «Електрофізичні та магніторезистивні властивості плівкових матеріалів на основі феромагнітних і благородних металів» за спеціальністю 105 – прикладна фізика та наноматеріали відповідає вимогам наказу Міністерства освіти і науки України № 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, Шумакова Марина Олегівна, заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 105 – прикладна фізика та наноматеріали.

## ОФІЦІЙНИЙ ОПОНЕНТ

Професор кафедри фізики металів  
фізичного факультету  
Київського Національного університету  
імені Тараса Шевченка,  
доктор фізико-математичних наук, професор

М.П. Семенько

