

ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертацію Бездідька Олександра Валерійовича

«Фізичні процеси в функціональних елементах гнучкої електроніки на основі металевих наноструктурованих матеріалів»,

яка подана на захист до разової спеціалізованої вченої Ради ДФ 55.051.26 Сумського державного університету для розгляду та проведення захисту дисертації на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали»

Актуальність теми дослідження. Інтерес до вивчення фізичних властивостей магнітнеоднорідних наноматеріалів із можливим спінозалежним розсіюванням електронів пов'язаний з можливістю їх використання у наноелектроніці та спінтроніці, бурхливий розвиток яких зумовив революційні зміни у сучасній твердотільній електроніці. З точки зору фундаментальної фізики, такі дослідження дають можливість розширити уявлення про структуру, фазовий склад та фізичні процеси, які протікають у несиметричних плівкових системах в умовах впливу температурних і магнітних полів. Хоча спінозвентильні та «псевдо» спінозвентильні структури добре відомі ще з кінця ХХ століття, їх детальне дослідження є актуальним у зв'язку з можливістю отримання інверсного магнітоопору, зумовленого різною величиною коефіцієнтів спінової асиметрії в суміжних шарах.

Для практичного використання згаданих структур у пристроях електроніки необхідно мати оптимальне поєднання функціональних параметрів: величини магнітоопору, магніторезистивної чутливості, магнітного гістерезису, необхідної величини поля перемагнічування і високої температурної стабільності. Для отримання наноструктур із заданими характеристиками необхідне розуміння особливостей впливу різних факторів, насамперед температури підкладки або термообробки, можливості стабілізації твердих розчинів чи реалізація фазових переходів на магнітні,



магніторезистивні та магніто-оптичні властивості багатошарових плівкових систем. Незважаючи на велику кількість експериментальних та теоретичних досліджень із вивчення цих проблем, ряд питань залишається до кінця не з'ясованим. Тому аргументованою є мета роботи, яка полягала у встановленні загальних закономірностей впливу розмірних, температурних і концентраційних ефектів та умов отримання і термооброблення на магнітні та магніторезистивні властивості несиметричних плівкових систем на основі феромагнітних металів, сплавів та впроваджених як окремі шари наночастинок феритів.

Загальна характеристика дисертаційної роботи. Дисертаційна робота виконана на кафедрі електроніки, загальної та прикладної фізики Сумського державного університету в рамках бюджетних тематик: «Термостабільні металеві спін-клапани для реалізації спінових клапанів в компонентах гнучкої сенсорної електроніки» (2017 – 2020 рр.) №0117V00392 та «Взаємозв'язок між магніторезистивними і магнітними властивостями та електронною структурою багатокомпонентних плівкових сплавів» (2020 – 2022 рр.) № 0120U102005. Окрім того, роботу було підтримано Грантом Польської академії наук для участі у роботі LIX Школи з фізики (м. Закопане, 2019 р.). Дисертаційна робота складається із анотації, вступу, п'яти 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 магнітонеоднорідних плівкових структур і наночастинок. При написанні

використано сучасні наукові джерела, більшість із яких 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.

Найважливіші наукові результати, що містяться в дисертації, та нові факти отримані дисертантом. Вирішення задач у відповідності до поставленої у роботі мети, дозволило одержати наступні наукові результати, що мають значну ступінь новизни.

1. У багат шарових структурах $[\text{Fe}(3)/\text{Pt}(3)]_n/\text{Pt}$ спостерігається збільшення основних магнітних параметрів порівняно з двошаровими плівками однакової ефективної товщини. Форма і характер петлі гістерезису, а також малі значення коерцитивної сили вказують на можливість використання таких матеріалів у пристроях, де на відміну від датчиків різке реагування важливіше, ніж точність вимірювання.

2. Результати дослідження дифузійних процесів показали, що у системах $(\text{Co-Cr})/\text{Cu}/\text{Co}$ в значній мірі зберігається індивідуальність шарів як в невідпаленому стані, так і після відпалювання при $T_{\text{відп}} = 700 \text{ K}$. У відпалених плівках відбувається проникнення атомів Cr через прошарок Cu та подальша взаємодифузія атомів Co та Cr в базовому шарі, як наслідок у плівках наявні фази $\alpha\text{-Co}$, $\beta\text{-Co}$, ГЦК-Cu та α - т.р. $\text{Co}(\text{Cr})$.

3. У областях малих ($d_{m2} \ll d_{m1}$) та великих ($d_{m2} \gg d_{m1}$) значень товщини d_{m2} накривного магнітного шару у порівнянні з товщиною d_{m1} базового магнітного шару сандвіча, амплітуда залежності МО має низькі значення в силу наявності ефекту шунтування. У разі виконання рівності $d_{m1} \cong d_{m2}$ ефект шунтування відсутній, і МРВ δ_{max} набуває максимального значення.

4. Фазовий склад свіжосконденсованих і термостабілізованих при температурі 700 K плівкових сплавів на основі FeNi та Cu відповідає ГЦК -

фазі т.р. FeNi(Cu) з параметром решітки $a = 0,360-0,361$ нм. Для плівкових сплавів FeNi(Cu) товщинами $d = 20 - 80$ нм і $c_{\text{FeNi}} = 50 - 90$ ат% у температурному інтервалі 120 - 400 К фіксується анізотропний характер магнітоопору з амплітудою поздовжнього та поперечного ефекту 0,02-0,5% залежно від товщини та концентрації компонент. Зниження температури вимірювання від кімнатної до 120 К призводить до збільшення величини магнітоопору в 1,2 - 2,2 рази залежно від концентрації компонент.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків, рекомендацій, сформульованих у дисертації. Дисертаційна робота Бездідька О.В. містить достатній об'єм експериментального матеріалу, достовірність якого базується на комплексному використанні сучасної бази методик досліджень, таких як електронна мікроскопія, ВІМС, вимірювання опору під дією змінного магнітного поля, а також комп'ютерної обробки результатів. Крім того, достовірність і обґрунтованість наукових результатів та висновків дисертаційної роботи забезпечується систематичністю і повторюваністю даних та узгодженням із даними інших авторів, отриманих на прикладі плівкових матеріалів подібної структури і хімічного складу. Все наведене 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); Ion Implantation and Other Applications of Ions and Electrons, June 18-21, 2018, Kazimierz Dolny, Poland; International Symposium LIV Zakopane School of Physics (Zakopane, Poland, 2019); XVII International Freik Conference on Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems (Ivano-Frankiv's'k, 2019); 8,9,10-th International Conference on Nanomaterials, Applications and Properties; Electronics and Informational Technologies, August 30 – September 2, 2018, Ukraine; Condensed Matter & Low temperature Physics

2020, June 8 – 14, 2020, Kharkiv, Ukraine; Magneto-optical properties of bilayer film systems based on Fe and Pt, 8-th International Conference on Nanotechnologies and Nanomaterials, August 26 – 29, 2020, Lviv, Ukraine.

Результати дисертації опубліковані у 16 працях, у т.ч. 9 статях, з яких 4 статті обліковуються наукометричною БД Scopus, та відносяться до фахових видань України, статті у зарубіжному виданні, 3 статтях у збірнику тез конференцій, що обліковуються БД Scopus і 7 тезах доповідей та 1 статті, яка додатково відображає 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. Результати роботи можуть бути використані у лабораторіях плівкового матеріалознавства дослідницьких установ НАН України та вищих навчальних закладів МОН України.

Отримані експериментальні результати поглиблюють розуміння впливу структурно-фазового стану, фазового складу та температури обробки на магніторезистивні та магніто-оптичні властивості несиметричних плівкових систем на основі магнітних і немагнітних металів та наночастинок. Проведені дослідження дозволяють отримати додаткову інформацію про особливості спін-залежного розсіювання електронів провідності у тришарових плівках з різною величиною коефіцієнтів спінової асиметрії в суміжних шарах.

Практичне значення дослідження полягає в тому, що отримані у роботі дані щодо фазового стану, кристалічної структури, магніторезистивних та магнітних властивостей плівкових систем зі спін-залежними розсіюванням електронів можуть бути використані у плівковому матеріалознавстві, металофізиці, у гнучкій та мікро- і наноелектроніці. Крім цього, результати, які отримані в роботі, можуть бути використані в навчальному процесі при підготовці магістрів та докторів філософії.

Оцінка змісту дисертації та її завершеності. Дисертація Бездідька О.В. є завершеною науково-дослідною роботою, в якій вирішена комплексна задача встановлення впливу структурно-фазового складу і коефіцієнта спінової асиметрії на особливості спін-залежного розсіювання носіїв заряду та величину магнітоопору несиметричних плівкових систем на основі феромагнітних металів, сплавів та впроваджених як окремі шари наночастинок феритів.

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

Дискусійні положення та зауваження до змісту дисертації. Дисертаційна робота, на мою думку, має деякі недоліки.

1. З огляду на те, що в назві роботи є словосполучення «елементи гнучкої електроніки», очікуваним було б побачити в роботі результати досліджень тензоефектів у розглянутих плівкових системах. Оскільки вони відсутні, лишається не зрозумілою доцільність внесення до назви роботи зазначеного терміну.

2. У літературному огляді подані деякі дані, які в подальшому не використовуються для обговорення результатів досліджень; наприклад, у підрозділі 1.1.3 результати щодо високоанізотропних магнітних матеріалів.

3. При аналізі магнітних характеристик двошарових плівок Cr(2)/Fe(25)/Π, осаджених при різних температурах підкладки ($T_{\Pi} = 300$ К і 450 К), значна увага приділяється впливу структурних дефектів на коерцитивну силу і майже не розглядається вплив розміру зерен та магнітної анізотропії.

4. Як зауваження, слід відзначити невеликий температурний (120 - 700 К) та концентраційний ($c_{\text{FeNi}} = 50 - 90$ ат.%) інтервали, у яких проводилися дослідження електропровідності і магніторезистивних властивостей плівкових сплавів FeNi(Cu).

5. У тексті дисертації зустрічаються незначні граматичні та стилістичні помилки, некоректна побудова речень.

Указані зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи, яка є завершеним науковим дослідженням, в якому отримані нові експериментальні результати, що дозволяють вирішити питання, пов'язані із фізичними процесами у плівкових матеріалах. Вважаю, що за актуальністю і новизною отриманих результатів, їх рівнем, обсягом, достовірністю та обґрунтованістю, науковим і практичним значенням та їх оформленням, дисертаційна робота «Фізичні процеси в функціональних елементах гнучкої електроніки на основі металевих наноструктурованих матеріалів» 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. із змінами, внесеними згідно з Постановами Кабінету Міністрів України № 979 від 21.10.2020 та № 608 від 09.06.2021 «Про затвердження Тимчасового порядку присудження ступеня доктора філософії», а її автор, Бездідько Олександр Валерійович, заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в 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

Підпис Данильченка С.М.

кандидата фізико-математичних наук, старшого наукового співробітника,

завідувача відділом радіаційної біофізики **завіряю.**

Учений секретар

Інституту прикладної фізики НАН України,

кандидат фізико-математичних наук



О.І. Ворошило