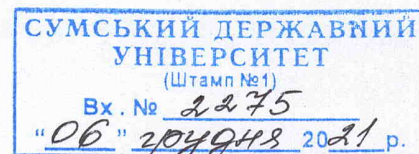


ВІДГУК
офіційного опонента професора
кафедри будівельних композиційних матеріалів та технологій
Харківського національного університету будівництва та архітектури,
доктора фізико-математичних наук, професора
Дехтярука Леоніда Васильовича
на дисертацію Шуляренка Дениса Олеговича
«Температурні та концентраційні ефекти в електро- і
магніторезистивних властивостях багатокомпонентних плівкових
наноструктур»,
яка подана на захист до разової спеціалізованої вченої Ради
ДФ 55.051.027 у Сумському державному університеті, що подана на
здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10
«Природничі науки» за спеціальністю 105 «Прикладна фізика і
наноматеріали»

Актуальність теми дослідження. Розвиток сучасних напрямків електроніки та технологій виготовлення сенсорної техніки, супроводжується зменшенням лінійних розмірів функціональних елементів, що забезпечується використанням нанорозмірних плівкових матеріалів. Безумовно це стимулює дослідження розмірних ефектів в електро-магніторезистивних, магнітооптичних, механічних та ін. властивостях матеріалів, загальна товщина яких не перевищує 100 нм. Крім того, на фізичні властивості багатокомпонентних плівкових наноструктур впливають технологічні умови їхнього отримання. Так, зокрема, вибір методу їх формування, може впливати на мікроструктуру зразків, особливості протікання дифузійних процесів, на магнітну анізотропію, а також на імовірність реалізації різних механізми розсіювання носіїв заряду (на дефектах кристалічної структури, на фонах, спин-залежне розсіювання в об'ємі плівок тощо).

Іншою важливою проблемою, яка на сьогодні ще не знайшла свого вирішення, є пошук матеріалів з високою температурною стабільністю, що дозволило розробити функціональні елементи зі стабільним робочими характеристиками.



Відомо, що пермалоевий стоп $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ є одним з базових матеріалів, який широко застосовується в технології магнітного запису, а також при виготовленні чутливих елементів сенсорів. Серед літературних джерел існує багато робіт, у яких зазначено, що шляхом додавання третього компонента до зазначеного стопу можна розширити сферу його застосування. Однак, практично відсутні роботи, в яких були б наведені результати досліджень плівкових матеріалів на основі стопу $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ для широкого концентраційного діапазону та загальної товщина меншої за 100 нм. Це і зумовило актуальність теми дисертаційної роботи та її мету, яка полягала у встановленні загальних закономірностей впливу концентраційних, розмірних та температурних ефектів на електро- і магніторезистивні властивості нанорозмірних плівкових матеріалів, сформованих на основі пермалоевого стопу $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ та Ag.

Дисертаційна робота виконана на кафедрі електроніки, загальної та прикладної фізики Сумського державного університету та має тісний зв'язок із науковими темами, які виконувалися на кафедрі. Основні результати дисертантом були одержані в процесі виконання держбюджетних науково-дослідних робіт Міністерства науки і освіти України: 0116U002623 «Вплив фізичних процесів на властивості спін-вентильних структур на основі плівок Fe, Co та Ag, Au, Cu і магнітних наночастинок» (2015-2018 рр.); 0117U003925 «Термостабільні металеві спін-клапани для реалізації спінових каналів в компонентах гнучкої сенсорної електроніки» (2017–2020 рр.); 0119U100777 «Магніторезистивні та магнітооптичні властивості композиційних матеріалів з впровадженими наночастинками» (2019-2021 рр.), де дисертант брав участь як виконавець наукових досліджень.

Найвагоміші наукові результати, що містяться в дисертації та нові факти одержані в роботі. Дисертаційна робота Шуляренка Д. О. має достатню ступінь опрацьованості досліджуваних багатокомпонентних плівкових наноструктур. Вирішення задач у відповідності до поставленої мети, дозволило дисертанту одержати наступні нові наукові результати.

1. Вперше отримані концентраційні залежності питомого опору $\rho(c_{\text{Ag}})$, термічного коефіцієнту опору $\beta(c_{\text{Ag}})$, а також концентраційну залежність температури заліковування дефектів у нанорозмірних матеріалах на основі пермалоевого стопу $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ та Ag. Показано, що зміна концентрації атомів немагнітного матеріалу в діапазоні від 20 до 85 ат.% призводить до появи мінімуму або максимуму на залежностях $\rho(c_{\text{Ag}})$ та $\beta(c_{\text{Ag}})$ відповідно. При цьому температура заліковування дефектів лежить у межах від 450 до 520 К в інтервалі концентрацій $c_{\text{Ag}} = 20\text{-}85$ ат.%.

2. Установлено, що методика формування нанорозмірних структур на основі пермалоевого стопу $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ та Ag (або одночасне випарування, або пошарова конденсація) за ідентичних технологічних умов не впливає на структурно-фазовий стан провідників і дозволяє регулювати їхні електрофізичні властивості (величину питомого опору і температурного коефіцієнта опору), шляхом зміни або концентрації компонент, або товщини і кількості шарів в нанокристалічній системі.

3. Експериментально досліджені концентраційні ($c_{\text{Ag}} = 20\text{-}85$ ат.%), розмірні ($d = 20\text{-}100$ нм, $c_{\text{Ag}} = 60$ ат.%) та температурні (за температурних інтервалів відпалювання $T_{\text{в}} = 300\text{-}900$ К та вимірювання $T_{\text{вим}} = 10\text{-}300$ К) ефекти в магнітоопорі (МО) провідників, що дозволило визначити оптимальні параметри ($c_{\text{Ag}} = 60$ ат.%, $d = 100$ нм, $T_{\text{в}} = 300$ К та $c_{\text{Ag}} = 60$ ат.%, $d = 60$ нм, $T_{\text{в}} = 300$ К) за яких реалізується ізотропний магнітоопір амплітудою до 2% при вимірюванні за кімнатної температури.

4. Показано, що характер розмірної залежності МО залежить від температури обробки зразків. Для невідпалених зразків у вихідному стані характерним є зростання магнітоопору при збільшенні товщини з виходом на насичення при товщині $d = 100$ нм. У той же час розмірна залежність МО зразків після термообробки характеризуються наявністю максимуму за товщини 60 нм і температури відпалювання $T_{\text{в}} = 500$ К, який зміщується в бік менших товщин ($d = 50$ нм) при зростанні температури відпалювання $T_{\text{в}}$ до 700 К.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків,

рекомендацій, сформульованих в дисертації. Достовірність одержаних наукових результатів та ступінь обґрунтованості наукових положень і висновків забезпечується: широким спектром застосованих при виконанні роботи сучасних методів досліджень, задіяним комплексним підходом до формування нанорозмірних матеріалів та дослідження їхнього структурно-фазового стану і фізичних властивостей (електро- та магніторезистивних).

Крім цього, *обґрунтованість наукових положень і висновків* забезпечується систематичністю і повторюваністю отриманих результатів, які узгоджуються з відповідними результатами інших авторів, отриманих при застосуванні інших методик.

Апробація дисертації та публікації. Основні наукові результати дисертаційної роботи оприлюднені та обговорені на таких конференціях: International Research and Practice Conference “Nanotechnology and Nanomaterials (NANO-2020) (м. Київ, 2020 р.); Міжнародній конференції студентів і молодих учених з теоретичної та експериментальної фізики «ЕВРИКА» (м. Львів, 2018, 2020 рр.); Науково-технічній конференції «Фізика, електроніка, електротехніка: ФЕЕ» (м. Суми, 2018-2021 рр.); XVII International conference on physics and technology of thin films and nanosystems (м. Івано-Франківськ, 2019 р.); XII-th International Conference «Ion Implantation and Other Applications of Ions and Electrons», ION (Kazimierz Dolny, Poland, 2018); International Conference «Clusters and Nanostructured Materials» (м. Ужгород, 2018 р.); Міжнародній конференції «Сучасні проблеми фізики конденсованого стану» (м. Київ, 2018 р.); International Conference “Electronics and applied physics” (м. Київ, 2017 р.).

Результати дисертаційної роботи відображені у 22 публікаціях: 4 статті у фахових виданнях України, які індексуються наукометричною базою Scopus, 2 статті у закордонних виданнях і 3 статті у матеріалах конференцій, що також обліковуються БД Scopus, та в 13 наукових працях у матеріалах Міжнародних та Всеукраїнських конференцій.

Оформлення дисертації відповідає вимогам, що висуваються до

такого виду робіт і наказу Міністерства освіти і науки України № 40 від 12 січня 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 дослідницьких установ НАН України та вищих навчальних закладів МОН України. Отримані експериментальні результати поглиблюють розуміння впливу методики формування нанорозмірних матеріалів на їх електрофізичні та магніторезистивні властивості та можуть стати методологічною основою для використання даного типу матеріалів як одного з функціональних шарів елементної бази наноелектроніки чи спінтроніки, а також безпосередньо для створення чутливих елементів сенсорів магнітного поля зі стабільним в часі робочими характеристиками.

Оцінка змісту дисертації та її завершеність. Дисертація Шуляренка Д. О є завершеною науково-дослідною роботою, в якій була розв'язана важлива проблема плівкового наноматеріалознавства, а саме встановлена кореляція між кристалічною структурою, фазовим складом, електрофізичними та магніторезистивними властивостями нанорозмірних плівкових матеріалів на основі пермалоевого стопу $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ та Ag.

Результати наукових досліджень автора повністю висвітлені у наукових роботах та відображені у змісті дисертаційної роботи.

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

1. Дискусійними є результати щодо визначення середнього розміру зерен магнітної та немагнітної компонент. По цій причині автор мав би більш докладно проаналізувати це питання, а саме побудувати гістограми розподілу зерен у зразках при зміні концентрації немагнітної компоненти, а також при збільшенні температурного інтервалу термообробки зразків (рис. 3.5).
2. На рис. 3.11, а наведені концентраційні залежності величини питомого опору $\rho(c_{\text{Ag}})$ та термічного коефіцієнту опору $\beta(c_{\text{Ag}})$, але не зроблені

висновки стосовно їхньої відповідності правилу Курнакова-Нордгейма.

3. Варто зазначити, що дослідження магніторезистивних властивостей при зменшенні температури вимірювання в інтервалі $T_{\text{вим}} = 10\text{-}300\text{ К}$ були проведені лише епізодично, а у випадку досліджень електрофізичних властивостей відсутність взагалі.
4. У пунктах 3.4 та 3.5 роботи була проведена апробація макроскопічної моделі для ТКО плівкового стопу для зразків отриманих методами одночасної та пошарової конденсації (у випадку системи $[\text{Pb}(1)/\text{Ag}(2,5)]_{16}/\text{P}$) з використанням співвідношень для ТКО двошарового провідника (для двошарової системи $\text{Pb}(16)/\text{Ag}(38)/\text{P}$). Це було зроблено з метою реалізації подальшого прогнозування електрофізичних властивостей нанорозмірних матеріалів, сформованих на основі пермалоєвого стопу $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ та Ag . При цьому у роботі відсутні будь-які розрахунки параметрів спин-залежного розсіювання носіїв заряду для досліджуваних зразків, в яких реалізується ізотропний МО.
5. На рис. 4.9 наведені польові залежності поздовжнього магнітоопору за різних температур вимірювання для плівкової наноструктури $(\text{Pb}+\text{Ag})/\text{P}$ за концентрації $c_{\text{Ag}} = 60\text{ ат.}\%$ та загальної товщини $d = 60\text{ нм}$. Для кращого сприйняття до сімейства польових залежностей бажано було б додати і залежність магнітоопору від температури вимірювання.
6. При обговоренні ефективності застосування досліджених плівкових матеріалів при виготовленні чутливих елементів сенсорів вартувало би приділити більше уваги до наявності чи відсутності для цих матеріалів магнітного та магніторезистивного гістерезису.
7. У тексті дисертації зустрічаються незначні граматичні та стилістичні помилки, зокрема, в деяких місцях або відсутні, або зайві розділові знаки, неправильне написання деяких слів тощо.

Проте наведені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Висновок. Вважаю, що дисертація на тему «Температурні та

концентраційні ефекти в електро- і магніторезистивних властивостях багатокомпонентних плівкових наноструктур», яка підготовлена за спеціальністю 105 «Прикладна фізика і наноматеріали» відповідає вимогам наказу Міністерства освіти і науки № 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 – Шуляренко Денис Олегович, заслуговує на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 105 «Прикладна фізика і наноматеріали».

ОФІЦІЙНИЙ ОПОНЕНТ:

Професор кафедри будівельних

композиційних матеріалів та технологій

Харківського національного університету

будівництва та архітектури,

доктор фізико-математичних наук, професор

Л. В. Дехтярук

