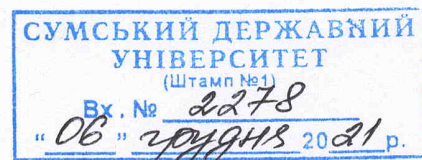


ВІДГУК
офіційного опонента завідувача відділу радіаційної біофізики
Інституту прикладної фізики НАН України, кандидата фізико-
математичних наук, старшого наукового співробітника
Данильченка Сергія Миколайовича
на дисертацію Шуляренка Дениса Олеговича
«Температурні і концентраційні ефекти в електро- і магніторезистивних
властивостях багатокомпонентних плівкових наноструктурах»,
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 та
наноматеріали»

Актуальність теми дослідження пов'язана з дослідженнями фізичних властивостей багатокомпонентних наноматеріалів, які мають широкі можливості практичного застосування як чутливих елементів сенсорів, у цифрових пристроях магніторезистивної пам'яті, автомобільній електроніці, біомедичних технологіях тощо. Дані дослідження спрямовані на вирішення комплексної проблеми, що полягає у створенні наноматеріалів із заданою мікроструктурою та властивостями, які б задовольняли вимогам сучасного рівня розвитку техніки та технологій. Серед феромагнітних матеріалів, які знайшли широке практичне застосування, можна виділити пермалоевий сплав $Ni_{80}Fe_{20}$, який відноситься до класу магнітом'яких феромагнетиків і характеризується низьким значенням коерцитивної сили, великою намагніченістю насичення та високою магнітною сприйнятливістю.

Сучасний етап розвитку електроніки стимулює перехід до нового нанорозмірного рівня при формуванні електронних приладів, який передбачає використання функціональних елементів з відносно малою загальною товщиною. У даному випадку важливу роль у фізичних властивостях починають відігравати так звані розмірні ефекти. Тим не менш, для нанорозмірних систем на основі пермалоевих сплавів Ni_xFe_{1-x} та благородних металів, сформованих методом одночасної конденсації компонент, комплексні дослідження структурно-фазового стану, магніторезистивних та електрофізичних властивостей в умовах прояву розмірних ефектів, а також з урахуванням концентрації компонент та умов термообробки, залишаються дуже обмеженими. Тому аргументованою є мета роботи, яка полягала у встановленні загальних закономірностей впливу концентраційних, розмірних та температурних ефектів на електро- і магніторезистивні властивості нанорозмірних плівкових матеріалів, сформованих на основі пермалоевого сплаву $Ni_{80}Fe_{20}$ та Ag.



Загальна характеристика дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота виконана на кафедрі електроніки, загальної та прикладної фізики Сумського державного університету та побудована за класичною схемою: анотація, вступ (встановлено зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, обґрунтовано актуальність теми дисертації 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) 4 розділів (літературний огляд, який присвячено фізичним властивостями плівкових наноструктур, сформованих на основі пермалою та немагнітних металів; методика і техніка експерименту; результати дослідження структурно-фазового стану, електро- і магніторезистивних властивостей досліджуваних наноматеріалів та їх обговорення), висновків та списку використаних джерел із 160 спеціальних і загальних джерел, у яких відображено різні аспекти обраної тематики дослідження.

Проведене в роботі комплексні дослідження взаємозв'язку кристалічної структури, фазового складу, електрофізичних та магніторезистивних властивостей нанорозмірних плівкових матеріалів на основі пермалоєвого сплаву $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ та Ag дозволили одержати нові наукові результати.

До найвагоміших наукових результатів, що містяться в дисертації слід віднести наступні:

1. Визначено, що фазовий склад нанорозмірних плівкових систем $(\text{Pu}+\text{Ag})/\text{П}$ незалежно від концентрації компонент ($c_{\text{Ag}} = 20-85$ ат.%) є двофазним, відповідає ГЦК- Ni_3Fe + ГЦК- Ag відповідно із параметрам ґратки $\bar{a} = 0,354-0,355$ та $0,407$ нм та залишається незмінним у процесі термообробки за температури $T_b = 700$ К. Показано, що за $c_{\text{Ag}} = 32-60$ ат.% відбувається перехід від кристалічної структури, що складається з зерен Ag впроваджених у феромагнітну матрицю пермалоєвого сплаву до структури де зерна феромагнітної компоненти впроваджені у немагнітну матрицю.

2. Вперше отримані концентраційні залежності питомого опору, ТКО, а також концентраційна залежність температури заліковування дефектів у нанорозмірних матеріалах на основі Pu і Ag . Показано, що зміна концентрації атомів немагнітного матеріалу в діапазоні від 20 до 85 ат.% призводить до появи мінімуму або максимуму відповідно на залежностях $\rho(c_{\text{Ag}})$ та $\beta(c_{\text{Ag}})$, що пов'язано зі змінами у кристалічній структурі зразків. Температура заліковування дефектів T_d в інтервалі концентрацій $c_{\text{Ag}} = 20-85$ ат.% лежить у межах від 450 до 520 К.

3. Установлено, що методика формування нанорозмірних структур на основі пермалоєвого сплаву $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ та Ag (одночасне випарування чи пошарова конденсація) за ідентичних технологічних умов (ступінь вакууму, швидкість осадження, температура підкладки) не впливає на структурно-фазовий стан і дозволяє регулювати їх електрофізичні властивості (величину питомого опору і ТКО), змінюючи або концентрацію компонент, або товщину і кількість шарів в системі. Близькі значення величин ρ та β для систем $[\text{Pu}(1)/\text{Ag}(2,5)]_{16}/\text{П}$ та $(\text{Pu}+\text{Ag})/\text{П}$ за $c_{\text{Ag}} = 60$ ат.% та $d = 55$ нм.

дозволяє зробити висновок про подібність структури багатошарової системи до структури плівки, сформованої методом одночасної конденсації компонент.

4. Установлено, що максимальне значення ізотропного магніторезистивного ефекту для свіжосконденсованих зразків становить 1,85 % за $c_{Ag} = 60$ ат.% і $d = 100$ нм та для термовідпалених – 1,80 % за $T_b = 500$ К за $c_{Ag} = 60$ ат.% і $d = 60$ нм (при вимірюванні за кімнатної температури). Зменшення температури вимірювання до 10 К спричиняє зростання величини МО до 3,5 %, при цьому характер польових залежностей залишається безгістерезистним з поступовим виходом на насичення.

Практична цінність результатів проведених комплексних експериментальних досліджень полягає в тому, що вони розширюють уявлення про фізичні процеси у нанорозмірних плівкових матеріалах в умовах впливу на них температурних та магнітних полів. Реалізований підхід дозволить розширити набір базових компонент та елементів електроніки зі стабільним робочими параметрами. Крім того проведені дослідження дозволили визначити концентраційний склад матеріалу та умови термообробки, які необхідні для формування чутливих елементів сенсорів неелектричних величин, стабільних за різних умов експлуатації. Таким чином, результати досліджень 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..

Залежність чутливості електричного опору від магнітного поля в нанорозмірних плівкових системах, як матеріалах для функціональних елементів датчиків, дає можливість установити швидкість реагування датчика на зміну вхідного сигналу, точність його вимірювання при детектуванні магнітних полів.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків, рекомендацій, сформульованих в дисертації забезпечується коректно підібраними умовами формування зразків методом електронно-променевого осадження та контролю товщини зразків та концентраційного складу; використанням сучасних експериментальних методик дослідження (електронна просвічуюча та атомно-силова мікроскопія, електроннографія; енергодисперсійний рентгенівський мікроаналіз, високоточна резистометрія із використанням автоматизованих систем керування експериментом, вібраційна та надпровідної квантової (SQUID) магнітометрія); комплексним підходом до аналізу особливостей електрофізичних та магніторезистивних властивостей плівкових систем з урахуванням даних про їх структурно-фазовий стан.

Крім того, достовірність і обґрунтованість наукових результатів дисертаційної роботи забезпечується достатнім рівнем апробації та високим рівнем наукових видань, в яких висвітлено результати роботи.

Апробація дисертації та публікації.

Основні наукові та практичні результати 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 «ЄВРИКА» (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 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». Текст дисертації написаний українською мовою в науковому стилі.

Водночас дисертаційне дослідження Шуляренка Дениса Олеговича містить **дискусійні моменти та недоліки**, висвітлення яких сприятиме більш повній та об'єктивній характеристиці результатів, отриманих автором.

1. Серед задач, які необхідно було вирішити є така «розробити методіку одержання плівкових нанорозмірних матеріалів на основі пермалоевого сплаву $Ni_{80}Fe_{20}$ та Ag, що дозволила б реалізувати в одному технологічному циклі широкий концентраційний склад», але в методиці говориться лише про удосконалення існуючих методик. Тому вважаю таке формулювання некоректним.

2. Висновки до розділу 1 висвітлюють результати, розглянуті в огляді, в той же час їх зміст не містить, за виключенням висновку 4, проблемного характеру, який підкреслював би актуальність та новизну тематики дисертації.

3. У п. 3.4 роботи автор наводять концентраційну залежність температури заліковування дефектів, яка відповідає температурі, при якій на першому циклі відпалювання спостерігається мінімум питомого опору на температурній залежності питомого опору. Було цікаво також проаналізувати як впливає зміна концентрації немагнітної компоненти на величину енергії активації заліковування дефектів. Однак, цього в роботі не було зроблено.

4. У п 4.4 (стор. 141) зазначено, що «Перевагою досліджуваних матеріалів є також їх достатньо висока стабільність у часі...». При цьому залишається не зрозумілим на якій підставі зроблене дане твердження, адже у роботі не наводяться дані щодо поведінки чутливості до магнітного поля у часі.

5. У висновку 4 до розділу 4 автор зазначає, що «ізотропний характер польових залежностей МО спостерігається лише для систем $[Ru/Ag]_n/Pt$ при $n = 8$ та 16 », але не вказує який характер магнітоопору для системи при $n = 2$ та 4 . Зазначається лише, що «для систем $[Ru/Ag]_n/Pt$ при $n = 2$ та 4 процес термообробки вже за $T_b = 400$ К спричиняє падіння амплітуди МО у $2,5$ ».

Висновок

Указані зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи Шуляренка Д.О., яка є завершеним науково-дослідним дослідженням, в якому отримані нові науково-обґрунтовані експериментальні результати, що дозволяють вирішити питання, пов'язані із фізичними процесами у нанорозмірних плівкових матеріалах на основі феромагнітного сплаву та благородного металу. Вважаю, що дисертація на тему «Температурні і концентраційні ефекти в електро- і магніторезистивних властивостях багатокомпонентних плівкових наноструктурах», яка підготовлена за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та 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 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