

ВІДГУК

**офіційного опонента, доктора фізико-математичних наук,
професора Денисова Станіслава Івановича
на дисертаційну роботу Петренка Руслана Миколайовича
«Електрофізичні і магніторезистивні властивості шаруватих структур на
основі металевих наночастинок та діелектричних матеріалів»,
представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії
за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали»**

1. Ступінь актуальності теми дисертаційної роботи.

Шаруваті структури феромагнітний метал/діелектрик відносяться до особливого типу наносистем, що характеризуються переходом від двовимірного (окремі шари системи залишаються структурно суцільними) до тривимірного (наночастинки феромагнітна компоненти ізолюються діелектричними каналами) типу. Такі матеріали можна використовувати для розробки термостабільних тунельних з'єднань для енергонезалежної пам'яті та мініатюрних магнітних безконтактних датчиків з низьким енергоспоживанням, високою міцністю та низькою собівартістю. При цьому значний прикладний потенціал (в першу чергу з точки зору зберігання інформації) мають структури, що одночасно поєднують у собі магнітоопір, характерний для магнітних гетероструктур та резистивного перемикання, що реалізується у різних типах напівпровідних або діелектричних матеріалах.

Механізми виникнення магнітоопору у шаруватих структурах на основі металевих наночастинок та діелектричних матеріалів досить складні й на сьогоднішній день вивчені не до кінця. Встановлено лише, що механізми переносу заряду і спіну в цих системах відіграють значну роль у реалізації магніторезистивного ефекту. При цьому характер магнітоопору (анізотропний чи ізотропний) та його величина залежать від складу системи та умов термообробки. Водночас актуальним стає питання щодо вивчення електрофізичних властивостей шаруватих структур феромагнітний метал/діелектрик, які суттєво відрізняються від масивних металевих зразків та однорідних плівок.

Це й зумовлює актуальність тематики дисертаційної роботи та її мету, яка полягала у встановленні загальних закономірностей впливу товщини феромагнітних і діелектричних шарів та умов термообробки шаруватих структур, сформованих на основі Fe та SiO_x, на їх структурно-фазовий стан, електропровідність, магніторезистивні та магнітні властивості..

2. Зв'язок теми дисертаційної роботи з науковими планами, програмами, фундаментальними та прикладними дослідженнями

Дисертаційна робота виконана на кафедрі електроніки, загальної та прикладної фізики Сумського державного університету в рамках держбюджетних тем: «Магніторезистивні та магнітооптичні властивості

композиційних матеріалів з впровадженими наночастинками» (2019-2021 рр.) № 0119U100777; «Взаємозв'язок між магніторезистивними і магнітними властивостями та електронною структурою багатокомпонентних плівкових сплавів» (2020-2022 рр.) № 0120U102005. Дисертант брав участь у виконанні зазначених НДР як виконавець наукових досліджень та під час підготовки проміжних і заключних звітів.

3. Ступінь обґрунтованості, достовірності наукових положень, висновків, рекомендацій, сформульованих в дисертації.

Наукові твердження, висновки та рекомендації, викладені автором у роботі представлені у логічній послідовності та ретельно обґрунтовані, виходячи з результатів експериментальних та теоретичних досліджень автора.

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 їх структурно-фазового стану і фізичних властивостей (електро- та магніторезистивних).

4. Наукова та практична цінність дисертації та новизна результатів

Дисертаційна робота має достатній ступінь опрацьованості досліджуваних шаруватих структур, повноти та конкретності і містить елементи новизни. Вирішення задач у відповідності до поставленої у роботі мети, дозволило одержати наступні наукові результати, що мають значну ступінь новизни.

1. Уперше на основі отриманих температурних залежностей електроопору для невідпалених та відпалених при температурах 400, 500, 600 і 700 К шаруватих структур $[\text{Fe}/\text{SiO}_x]_5$ встановлені інтервали товщин шарів Fe та SiO_x при яких реалізуються різні режими провідності.

2. Встановлено, що для невідпалених шаруватих структур $[\text{Fe}/\text{SiO}_x]_5$ в інтервалі товщин шарів $d_{\text{Fe}} = 5 - 10$ нм та $d_{\text{SiO}_x} = 1 - 10$ нм спостерігається лише анізотропний характер польових залежностей. Перехід до ізотропного магнітоопору відбувається для зразків з $d_{\text{Fe}} = 4-6$ нм та $d_{\text{SiO}} = 5$ нм після відпалювання за температури 400 К.

3. Уперше за результатами дослідження температурних залежностей намагніченості шаруватих структур $[\text{Fe}(5)/\text{SiO}_x(3)]_5/\text{П}$ отриманих при вимірюванні в процесі охолодження у магнітному полі індукцією 100 мТл та без магнітного поля встановлена відсутність атомів Fe та дуже дрібних частинок феромагнітного матеріалу в діелектричній матриці.

Крім цього, обґрунтованість наукових положень і висновків забезпечується систематичністю і повторюваністю отриманих результатів, які узгоджуються з результатами інших авторів, які застосовували відмінні методики.

5. 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 стабільними в часі робочими характеристиками.

6. Повнота викладу основних результатів дисертації в опублікованих працях

Основні результати дисертаційної роботи Петренка Р.М. опубліковані у 14 працях з них 3 статті у закордонних виданнях, 1 стаття у фаховому виданні України і 1 стаття у матеріалах конференцій, які індексуються наукометричною базою даних Scopus та 9 наукових працях у матеріалах Міжнародних та Всеукраїнських конференцій.

В усіх опублікованих працях Петренком Р.М. ґрунтовно та в повному обсязі висвітлені основні наукові положення, результати та висновки дисертації. Наукові положення та результати досліджень, що отримані дисертантом, проходили апробацію на різних рівнях, обговорювалися на наукових конференціях як національного, так і міжнародного рівня.

7. Оцінка змісту дисертаційної роботи, її завершеність

Дисертаційна робота Петренка Руслана Миколайовича є завершеною науковою роботою, яка складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних джерел з 138 найменувань. Дисертацію викладено на 132 сторінках, із них 106 сторінок основного тексту та містить 49 рисунків і 2 таблиці.

Анотація належним чином відображає основний зміст дисертації, повно висвітлює наукові висновки та практичне значення даної роботи.

У вступі зазначається актуальність теми дисертаційної роботи, чітко визначені мета та основні завдання, вказані, об'єкт та предмет дослідження, описана наукова новизна та практичне значення отриманих результатів. Також відзначається особистий внесок автора, наводять дані про структуру та обсяг роботи.

У першому розділі дисертації представлений літературний огляд за темою роботи. Детально розглянуто особливості фазового складу, магнітні та транспортні властивості композитних структур на основі феромагнітних та діелектричних матеріалів. Показано, що для коректного аналізу електро- та магнітотранспортних властивостей досліджуваних структур доцільним є

проведення додаткових досліджень, пов'язаних з вивченням їх кристалічної структури та процесів фазоутворення.

У другому розділі дисертації описана методика і техніка експериментальних досліджень. Для формування композитних матеріалів, що складаються з феромагнітних наночастинок, розділених діелектричними каналами (т. зв. гранульованих структур) автором був використаний метод пошарової конденсації, який детально описаний в роботі. Особливість методики формування шаруватих структур $[\text{Fe}(d_{\text{Fe}})/\text{SiO}_x(d_{\text{SiO}_x})]_n/\text{П}$ полягала у поступовому зменшенні ефективної товщини феромагнітного шару d_{Fe} при фіксованій ефективній товщині діелектричного d_{SiO_x} , щоб зафіксувати товщину d_{Fe} при якій відбувається перехід від шаруватої до гранульованої структури. Автором також описані методики дослідження структурно-фазового стану, електрофізичних, магніторезистивних та магнітних властивостей шаруватих структур.

У третьому розділі проведено дослідження структурно-фазового стану та електрофізичних властивостей шаруватих структур на основі Fe та SiO_x . Показано, що зменшення ефективної товщини металевих шарів d_{Fe} з 10 до 4 нм супроводжується переходом у структурі плівкових зразків від шаруватої, для якої середній розмір феромагнітних зерен $L = 10 - 15$ нм, до гранульованої, що складається із феромагнітних наночастинок середнім розміром $L = 3 - 4$ нм, які розділені діелектричними каналами шириною до 2 нм. Зміна співвідношення між ефективними товщинами феромагнітних та діелектричних металів дозволила автору встановити умови для реалізації трьох режимів провідності: металевого, перехідного та діелектричного.

У четвертому розділі роботи представлені результати досліджень магніторезистивних та магнітних властивостей шаруватих структур на основі Fe та SiO_x . Визначені оптимальні умови для спін-залежного тунелювання електронів і, як наслідок, максимальні значення ізотропного магнітоопору можна отримати двома методами: конденсуючи на підкладку при кімнатній температурі плівку Fe/ SiO_x ефективною товщиною 5 – 6 нм або відпалюючи за температури 550 К плівку ефективною товщиною 3-4 нм. За результатами дослідження температурних залежностей намагніченості отриманих при вимірюванні в процесі охолодження у магнітному полі індукцією 100 мТл та без магнітного поля для шаруватих структур автором було зроблено висновок про відсутність атомів Fe в діелектричній матриці та дуже дрібних частинок феромагнітного матеріалу.

Висновки автора належним чином адаптовані до визначених мети та завдань дисертаційної роботи. Їх структура чітко відображає основні результати наукових досліджень, проведених автором в рамках роботи.

Академічна доброчесність. У дисертаційній роботі та наукових публікаціях дисертанта не було виявлено порушень академічної доброчесності, що стосуються представлення основних наукових результатів. Автор дотримувався високих стандартів наукової доброчесності та об'єктивності у викладенні отриманих даних. Значено, що наведені у дисертації результати є об'єктивним відображенням проведених наукових

досліджень, а автор виявив належний рівень професійної етики у представленні власних висновків та інтерпретації отриманих результатів.

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». Мова та стиль викладення результатів дисертації демонструють високий рівень дисертанта.

8. Зауваження щодо змісту та оформлення дисертації.

Дисертаційна робота виконана на високому професійному рівні, і в цілому залишає позитивне враження. Однак, на мою думку, має деякі недоліки.

1. Для підтвердження якості отриманих зразків у процесі високотемпературного відпалювання доцільно було б навести спектри енергодисперсійного аналізу для зразків до та після відпалювання. Це дало б відповідь на питання, чи не відбулося забруднення поверхні зразків під час термообробки, що також могло вплинути на транспортні властивості шаруватих структур.
2. У роботі наводяться гістограми розподілу феромагнітних наночастинок у зразках до та після термообробки зразків, однак відсутній опис методи побудови гістограм. Зокрема, не вказано, яке програмне забезпечення було використано для визначення розміру кристалів та побудови гістограм.
3. Як зауваження, слід відзначити той факт, що дослідження магнітних властивостей при зниженні температури вимірювання в інтервалі $T_{\text{вим}} = 10\text{-}300\text{ K}$ були проведені лише епізодично, а у випадку досліджень електрофізичних властивостей відсутність взагалі.
4. У роботі було б доцільно навести більш детально опис як здійснювала апробація теоретичної моделі тунельного магнітоопору, що враховує поділ феромагнітних гранул на дві категорії: суперпарамагнітні та однодоменні.
5. У тексті дисертації зустрічаються незначні граматичні та стилістичні помилки, зокрема, в деяких місцях відсутні або зайві розділові знаки, неправильне написання деяких слів, некоректна побудова речень.

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

Дисертація є результатом індивідуальної та самостійної роботи дослідника, відповідає вимогам спеціальності 105 «Прикладна фізика та наноматеріали», а її тематика в повній мірі відповідає даній спеціальності.

9. Загальний висновок.

Дисертаційна робота Петренка Руслана Миколайовича на тему: «Електрофізичні і магніторезистивні властивості шаруватих структур на основі металевих наночастинок та діелектричних матеріалів» є завершеним самостійним науковим дослідженням, що має як теоретичну новизну, так і

практичне застосування. Вона характеризується актуальністю, науковою новизною, практичною значущістю та впровадженням отриманих результатів та методико-теоретичних положень.

Дисертація повністю відповідає вимогам п. 6-9 наказу «Порядку присудження ступеня доктор філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступення доктор філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. №44, а її автор – Петренко Руслан Миколайович – заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали».

ОФІЦІЙНИЙ ОПОНЕНТ:

провідний науковий співробітник
Інституту прикладної фізики НАН України,
доктор фізико-математичних наук,
професор



Станіслав ДЕНИСОВ

Підписе прел. н.с., д.ф.-м.н., проф. Денисова С.Г.
засвідчує, чл. секр. ІПФ НАН України

Ворошило

О.Т.

