

**Відгук офіційного опонента –
доктора фіз.-мат. наук, професора Товстолиткіна Олександра
Івановича
на дисертацію Петренка Руслана Миколайовича
«Електрофізичні і магніторезистивні властивості шаруватих
структур на основі металевих наночастинок та діелектричних
матеріалів»,
подану на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 105
«Прикладна фізика та наноматеріали»**

Актуальність теми дослідження

Дисертаційна робота Петренка Р.М. є завершеною науковою працею та представляє комплексне систематичне дослідження структурно-фазового стану конденсованих нанорозмірних композиційних матеріалів «ферромагнітний метал-діелектрик» функціонального призначення, а також електрофізичних, магнітних та магніторезистивних характеристик (питомий електроопір, коерцитивна сила, поле насичення, магнітоопір тощо) та впливу на них умов конденсації, термообробки і розмірних ефектів.

На сучасному етапі розвитку плівкового матеріалознавства подальше поглиблення знань у галузі фізики плівкових приладових структур відбувається у напрямі досліджень магнітно-неоднорідних матеріалів типу «ферромагнітний метал-діелектрик». Саме у таких плівкових матеріалах спостерігається один з фундаментальних ефектів – ефект тунельного магнітоопору. На основі зазначеного ефекту було розроблено ряд приладових структур різного функціонального призначення, зокрема запам'ятовуючі пристрої нового покоління. Незважаючи на те, що на час постановки задач у рамках представленої дисертаційної роботи вже була значна кількість експериментальних результатів щодо магніторезистивних і магнітних властивостей композиційних матеріалів «ферромагнітний

металдіелектрик», на сьогодні триває активний пошук та дослідження нових функціональних наноструктурованих плівкових матеріалів зі спінзалежним тунелюванням електронів із покращеними робочими характеристиками і параметрами. Зокрема, запропонований метод формування композитних матеріалів «метал-діелектрик» методом пошарової конденсації дозволив отримати композитні матеріали з діелектричною аморфною матрицею практично без вмісту атомів феромагнітних металів, майже з однаковим розміром магнітних гранул та зміною цих розмірів у разі необхідності.

Отже, дослідження структурних характеристик, магніторезистивних, магнітних та електрофізичних властивостей композитних плівкових матеріалів є досить актуальними. Таке дослідження має важливе наукове та практичне значення і сприяє подальшому розвитку технологій для розробки ряду приладових структур різного функціонального призначення.

Актуальність теми дисертації Петренка Р.М. підтверджується також тим фактом, що вона виконувалась у рамках держбюджетних тем, які фінансувалися Міністерством освіти і науки України.

Наукова новизна результатів дослідження

Одержані результати дають можливість удосконалити методику отримання композитних матеріалів «феромагнітний метал-діелектрик» із покращеними необхідними властивостями, які можуть бути використані для розширення елементної бази наноелектроніки та спінтроніки.

У результаті дослідження сформульовано низку положень і висновків, що містять елементи наукової новизни, зокрема:

1. Уперше показано, що зменшення ефективної товщини шарів Fe у системі $[\text{Fe}(d_{\text{Fe}})/\text{SiO}_x(5)]_5/\text{П}$ від 10 до 4 нм спричиняє перехід структури від

шаруватої до гранульованої, що складається з наночастинок із середнім розміром 3 – 4 нм. Встановлено, що фазовий склад зразків при $d_{\text{Fe}} = 10$ нм та $d_{\text{SiO}_x} = 2 - 10$ нм відповідає ОЦК-Fe і не змінюється у процесі термообробки до температури 800 К, для зразків з $d_{\text{Fe}} = 3 - 5$ нм, відпалених за температури 800 К фіксується двофазний склад, що відповідає ОЦК-Fe + ГЦК-FeO.

2. На основі отриманих температурних залежностей електроопору для невідпалених та відпалених за різних температур шаруватих структур $[\text{Fe}/\text{SiO}_x]_5$ встановлені інтервали товщин шарів Fe та SiO_x , при яких реалізуються різні режими провідності.

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

Зміст дисертації та відповідність встановленим вимогам

Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних джерел із 138 найменувань на 15 сторінках. Дисертацію викладено на 132 сторінках, із них – 106 сторінок основного тексту. Робота містить 49 рисунків і 2 таблиці.

Дисертація написана послідовно за формально-логічною структурою з дотриманням наукового стилю викладення в ній матеріалів досліджень, наукових положень та висновків, що забезпечує доступність їх сприйняття. Вступ дисертаційної роботи містить загальну характеристику роботи та обґрунтування актуальності обраної теми досліджень. Автором

сформульована мета та задачі досліджень, розкритий зв'язок роботи з науковими планами, відображена наукова новизна та практична цінність отриманих результатів.

У *першому розділі*, що є літературним оглядом, здійснено глибокий та критичний аналіз наявних результатів за темою дисертаційної роботи. На основі такого аналізу і були сформульовані напрями подальших досліджень.

У *другому розділі* описані методи, методики та приладова база для виготовлення і дослідження плівкових зразків. Відповідно до поставлених задач проведення комплексних досліджень структурно-фазового стану та електро- і магніторезистивних властивостей шаруватих структур, сформованих на основі Fe та SiO_x , були застосовані наступні методи отримання та дослідження зразків: пошарової електронно-променевої конденсації у вакуумі; кварцового резонатора для прецензійного вимірювання та контролю товщини досліджуваних зразків у процесі їх формування; енергодисперсійного аналізу для визначення елементного та концентраційного складу шаруватих структур; електроннографії та просвічуючої електронної мікроскопії; високоточної резистометрії із використанням автоматизованих систем управління експериментом для дослідження електропровідності та магнітоопору у двох геометріях вимірювання (поздовжньої та поперечної). Додатковий аналіз магнітних властивостей досліджуваних шаруватих структур проведений методом SQUID-магнітометрії в інтервалі температур 10 – 300 К.

У *третьому розділі* «Структурно-фазовий стан та електрофізичні властивості шаруватих структур на основі Fe та SiO_x » наведено експериментальні результати щодо структурно-фазового складу та електропровідності острівцевих плівок Fe та шаруватих структур $[\text{Fe}/\text{SiO}_x]_n$.

На основі отриманих результатів встановлено, що зменшення ефективної товщини металевих шарів d_{Fe} з 10 до 4 нм супроводжується переходом у структурі плівкових зразків $[\text{Fe}/\text{SiO}_x]_n$ від шаруватої, для якої середній розмір феромагнітних зерен складає $L = 10 - 15$ нм, до гранульованої, що складається із феромагнітних наночастинок із середнім розміром $L = 3 - 4$ нм, які розділені діелектричними каналами шириною до 2 нм. Показано, що невідпалені та відпалені за температур $T_{\text{в}} = 400, 500, 600$ та 700 К шаруваті структури $[\text{Fe}(d_{\text{Fe}})/\text{SiO}_x(d_{\text{SiO}_x})]_5/\text{П}$ при $d_{\text{Fe}} < 5$ нм та $d_{\text{SiO}_x} = 5 - 6$ нм характеризуються діелектричним режимом провідності в інтервалі $T_{\text{в}} = 290 - 700$ К. Збільшення d_{Fe} до 5 нм спричиняє зменшення величини ТКО за абсолютною величиною. При ефективних товщинах металевих шарів понад 6 нм, незалежно від товщини діелектричних шарів, спостерігається хід кривої $\rho(T)$ з додатним значенням ТКО, що характерно для металічного режиму провідності. Після термообробки за 800 К від'ємний знак температурного коефіцієнту опору зберігається лише для зразків з $d_{\text{Fe}} = 3$ нм.

Наведені залежності величини питомого опору від ефективної товщини металевих шарів Fe показують, що, незалежно від температури термообробки, величина питомого опору монотонно зменшується зі збільшенням d_{Fe} .

У четвертому розділі «Магніторезистивні властивості шаруватих структур на основі Fe та SiO_x » розглянуто результати дослідження магніторезистивного ефекту в шаруватих плівкових системах $[\text{Fe}/\text{SiO}_x]_5/\text{П}$ при товщинах $d_{\text{Fe}} = 5 - 10$ нм та $d_{\text{SiO}_x} = 1 - 10$ нм. Встановлено, що характер польових залежностей магнітоопору та амплітуда магніторезистивного

ефекту для такого типу шаруватих структур визначається їх структурою, яка залежить від ефективних товщин як прошарків SiO_x , так і магнітних шарів Fe.

Показано, що для невідпалених шаруватих структур $[\text{Fe}/\text{SiO}_x]_5$ з ефективною товщиною шарів Fe 2 – 5 нм магнітний гістерезис за кімнатної температури не спостерігався. Для таких зразків гістерезис з'являється після зниження температури вимірювання до 10 К. Крім того, величина намагніченості залежить від температури. Усе це свідчить, що структури $[\text{Fe}/\text{SiO}_x]_5/\text{П}$ з $d_{\text{Fe}} = 2 - 5$ нм та $d_{\text{SiO}_x} = 3 - 5$ нм поведуть себе як система суперпарамагнітних частинок.

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

Практичне значення результатів дисертаційної роботи та зв'язок з науковими програмами та темами

Дисертаційне дослідження відповідає пріоритетним напрямкам наукових досліджень Сумського державного університету, зокрема держбюджетним науково-дослідним роботам «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.

Отримані в роботі експериментальні результати мають свою цінність як з точки зору фундаментального, так і прикладного значення. Результати досліджень можуть стати методологічною основою для використання даного типу матеріалів безпосередньо для створення надчутливих елементів сенсорів магнітного поля з покращеними робочими характеристиками.

Академічна доброчесність

Ознак порушення автором академічної доброчесності, зокрема випадків оприлюднення, частково або повністю, наукових результатів, отриманих іншими особами, як результатів власного дослідження або відтворення опублікованих текстів інших авторів без зазначення їх авторства не виявлено.

Зауваження до дисертаційної роботи

Загалом, позитивно оцінюючи наукове і практичне значення отриманих дисертантом результатів, варто зазначити наступні дискусійні положення та зауваження до змісту дисертаційної роботи Петренка Р.М. «Електрофізичні і магніторезистивні властивості шаруватих структур на основі металевих наночастинок та діелектричних матеріалів»:

1. Структурні, електро- та магніторезистивні властивості плівкових матеріалів можуть залежати від виду підкладинок (монокристалічні, полікристалічні чи аморфні), але ці обставини практично не розглядаються в дисертації при порівнянні результатів експериментів, одержаних для однотипних плівок на різних підкладках.

2. Як зауваження, слід зазначити відносно неширокий температурний інтервал (300 – 800 K), в межах якого проводилися дослідження електропровідності.

3. Слід було б детальніше обговорити причини зміни характеру магнітоопору (перехід від анізотропного до ізотропного характеру польових залежностей магнітоопору) для зразків $[\text{Fe}(d_{\text{Fe}})/\text{SiO}_x(5)]_5/\text{П}$ після термообробки за температури 400 K.

4. Недостатньо уваги приділено обговоренню властивостей інтерфейсу між магнітними і діелектричними шарами, зокрема щодо зміни цих властивостей у результаті утворення твердих розчинів при відпалюванні.

5. Варто було б навести ZFC-FC залежності, отримані при вимірюванні у процесі охолодження без магнітного поля та у магнітному полі з індукцією 100 мТл для шаруватих структур з різною товщиною магнітних та діелектричних шарів.

6. У роботі не наведено порівняння одержаних в ході досліджень результатів різних властивостей плівок з аналогічними даними для подібних шаруватих структур, які були одержані іншими авторами.

7. Варто було б детальніше обговорити проблему часової стабільності функціональних елементів на основі шаруватих структур зі спін-залежним тунелюванням електронів.

8. У тексті дисертації зустрічаються граматичні та стилістичні помилки, зокрема, в деяких місцях відсутні або зайві розділові знаки та некоректна побудова речень.

Однак, наведені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Висновок про відповідність роботи встановленим вимогам МОН України

Дисертація Петренка Р.М. «Електрофізичні і магніторезистивні властивості шаруватих структур на основі металевих наночастинок та діелектричних матеріалів», подана на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали», є завершеним дослідженням, яке містить низку нових, актуальних та достовірних результатів, що спрямовані на вирішення актуального наукового завдання покращення властивостей композитних матеріалів «феромагнітний метал-діелектрик». Під час аналізу дисертаційної роботи випадків порушення академічної доброчесності не було виявлено. Дисертаційна робота Петренка Руслана Миколайовича за актуальністю проблеми, обсягом, ґрунтовністю аналізу та інтерпретацією отриманих даних, повнотою викладу принципів наукових положень, науково-теоретичним та практичним значенням повністю відповідає вимогам п. 6 «Порядку присудження ступеня доктор філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44, а дисертант Петренко Руслан Миколайович заслуговує присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали».

Директор Інституту магнетизму
НАН України та МОН України,
д.ф.-м.н., професор



Олександр ТОВСТОЛИТКІН

27 грудня 2023 р.