

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Костюк Дмитро Миколайович



УДК 537.621.3; 535.511; 532.582.7

**ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МАГНІТНИХ НАНОЧАСТИНОК
У ПРОВІДНІЙ МАТРИЦІ**

Спеціальність 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Суми – 2017

Дисертацією є рукопис.
Робота виконана у Сумському державному університеті
Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник – доктор фізико-математичних наук, професор
Проценко Сергій Іванович,
Сумський державний університет,
декан факультету електроніки та інформаційних
технологій.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Семенко Михайло Петрович,
Київський національний університет
імені Тараса Шевченка,
професор кафедри фізики металів;

доктор фізико-математичних наук, професор
Пономарьов Олександр Георгійович,
Інститут прикладної фізики НАН України,
завідувач відділу фізики пучків заряджених
частинок.

Захист відбудеться « 24 » березня 2017 року о 12-й годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 55.051.02 у Сумському державному університеті за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, корпус ЕТ, ауд. 236.

E-mail: d55.051.02@sumdu.edu.ua.

Із дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Сумського державного університету за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, а також на сайті інституційного репозитарію СумДУ. Режим доступу: <http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/50030>.

Автореферат розіслано « 23 » лютого 2017 року.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради



І. В. Чешко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Дослідження та практичне впровадження приладових структур на основі нанорозмірних об'єктів – на сьогодні завдання багатьох наукових лабораторій світу. Відомі технології синтезу дозволяють отримувати монодисперсні розчини металевих наночастинок (НЧ) різного складу і розмірів разом з їх подальшою функціоналізацією різноманітними органічними сполуками. Таким чином вдається розширити сферу використання НЧ від біологічних нанороботів для точкового доставляння ліків у медицині до високощільних структур для збереження інформації в електроніці та хімічних датчиках. Цим обумовлена підвищена увага до формування упорядкованих масивів НЧ (УМНЧ). Проте малодослідженими залишаються магніторезистивні властивості таких УМНЧ у провідних матрицях немагнітних матеріалів, що є важливим із точки зору практичного використання в області сенсорики та спінтроніки. Більше того, останнім часом проводяться інтенсивні дослідження графенового матеріалу, що могли б стати ефективною заміною металевим провідним матрицям. Нанорозмірний високодефектний графен може бути ефективно використаний як основа хімічних датчиків шкідливих газів, що є відносно новим підходом до проектування чутливих елементів. Чутливі елементи хімічних датчиків шкідливих газів на основі лише НЧ давно вивчаються дослідниками, проте невирішеним залишається питання зниження робочих температур, що дещо сповільнюють процес упровадження таких елементів у, наприклад, мобільні прилади з обмеженою енергоємністю. Перспективним напрямом електронного приладобудування на сьогодні вважається формування наноструктурованих функціональних поверхонь для створення чутливих елементів сенсорики. Декорування нанорозмірного графену УМНЧ робить можливим створення чутливих елементів із налаштовуваними в широкому діапазоні характеристиками, а саме підвищенням чутливості та вибіркової при детектуванні газу за умов атмосфери. Із вищезазначеного випливає актуальність тематики дисертаційної роботи та напряму проведення досліджень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, результати яких представлені в дисертації, виконані у відповідно до планів науково-дослідних робіт кафедри прикладної фізики Сумського державного університету та пов'язані з виконанням завдань держбюджетних НДР «Вплив процесів гранулізації і спін-залежного розсіювання електронів на фізичні властивості плівкових твердих розчинів» (2015 – 2017 рр., № 0115U00689) та «Вплив фізичних процесів на властивості спін-вентильних структур на основі Fe, Co та Ag, Au, Cu і магнітних наночастинок» (2016 – 2018 рр., № 0116U002623), у яких дисертант брав участь як виконавець. Також у дисертаційну роботу включені результати, що були отримані під час виконання індивідуальних грантів у рамках програми

МОН України «Навчання студентів і аспірантів та стажування наукових і науково-педагогічних працівників у провідних вищих навчальних закладах за кордоном» в Інституті фізики Університету Йоганна Гутенберга (м. Майнц, Німеччина, 2012 та 2014 рр.) та індивідуального гранту Словацького стипендіального фонду «SAIA» в Інституті фізики Словацької Академії Наук (м. Братислава, Словаччина 2013 р.).

Мета і задачі дослідження. Основна мета цієї роботи полягала у дослідженні особливостей формування УМНЧ, нанорозмірного мультишарового графену (МШГ) та систем типу провідна матриця/НЧ/підкладка як чутливих елементів датчиків магнітних величин і хімічних датчиків шкідливих газів. Для досягнення поставленої мети необхідно було розв'язати такі наукові задачі:

– розробити та реалізувати автоматизовану систему контролю нанесення провідної металевої матриці, вдосконалити програмно-апаратний комплекс для дослідження магніторезистивних властивостей, а також розробити відповідне програмне забезпечення для керування системами збору, обробки та аналізу експериментальних даних;

– дослідити фізичні процеси, що протікають в УМНЧ, МШГ та комбінованих мультишарах на їх основі при формуванні чутливих елементів датчиків магнітних величин та хімічних газових датчиків NO_2 ;

– дослідити вплив температурної обробки на структурно-фазовий стан УМНЧ Fe_3O_4 , CoFe_2O_4 , NiFe_2O_4 та їх магніторезистивні, оптичні й магнітооптичні властивості у провідній матриці Ag різної товщини;

– проаналізувати вплив декорування шарів МШГ двовимірними ансамблями магнітних НЧ на робочі характеристики (чутливість, вибірковість, робоча температура) чутливих елементів хімічних газових датчиків NO_2 .

Об'єкт дослідження – процеси пакування та фазоутворення в УМНЧ Fe_3O_4 , CoFe_2O_4 , NiFe_2O_4 у провідній матриці Ag , МШГ і мультишарів на їх основі.

Предмет дослідження – кристалічна структура, фазовий склад, морфологія поверхні, магнітоопір, магнітооптичний ефект Керра та газова чутливість чутливих елементів датчиків магнітних величин і хімічних газових сенсорів NO_2 у вигляді УМНЧ Fe_3O_4 , CoFe_2O_4 , NiFe_2O_4 у провідній матриці Ag , нанорозмірного МШГ та комбінованих мультишарів на їх основі.

Методи дослідження: методи формування наноструктурованих плівок (метод Ленгмюра – Блоджетт, спін-коатингу та вакуумної конденсації), експериментальні методи дослідження фізичних властивостей твердих тіл (просвічувальна і растрова електронна та атомно-силова мікроскопія, електронографія, раманівська спектроскопія, чотириточковий метод вимірювання електричного опору, методика вимірювання ефекту Керра, нуль-еліпсометрія), математичні методи обробки експериментальних даних, програмування з елементами моделювання в середовищі LabVIEW.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Уперше встановлено вплив збільшення товщини провідної матриці Ag (від 5 до 20 нм) та умов її термообробки на характер зміни величини магнітоопору у наноструктурованих плівкових системах магнітні наночастинки/провідна матриця. Показано, що зменшення величини магнітоопору при збільшенні товщини провідної матриці пов'язано із шунтуванням меж поділу НЧ/провідна матриця. Збільшення величини магнітоопору після термообробки провідної матриці ($T_g = 600$ K) обумовлене збільшенням площі меж поділу НЧ/провідна матриця.

2. Уперше показано, що зменшення середніх геометричних розмірів фрагментів мультишарового графену від 10 мкм до 300 нм покращує їх чутливість до молекул газу NO_2 за кімнатної температури від 3 до 20 %, відповідно, що обумовлено підвищенням концентрації крайових дефектів.

3. На основі проведених розрахунків згідно з модифікованою феноменологічною моделлю електрофізичних властивостей гранульованих плівкових сплавів показано, що величина електричного опору приладових структур на основі термооброблених ($T_g = 1100$ K) масивів наночастинок залежить від товщини провідної матриці та умов її термообробки ($T_g = 600$ K). Установлено, що збільшення величини електричного опору після термообробки провідної матриці пов'язано з формуванням на поверхні зразка мережових структур із провідної немагнітної матриці та магнітних наночастинок.

4. Уперше показано, що заповнення шару, сформованого із фрагментів МШГ, наночастинами NiFe_2O_4 на 80 % обумовлює збільшення його чутливості до молекул газу NO_2 на 40 %.

Практичне значення одержаних результатів. Результати дослідження процесів фазоутворення, магніторезистивних, магнітооптичних та електрофізичних властивостей наноструктур у вигляді ансамблів НЧ Fe_3O_4 , CoFe_2O_4 , NiFe_2O_4 у провідній матриці значно підвищує ефективність методологічної основи формування подібних наноматеріалів для потреб сучасної функціональної та сенсорної електроніки. Результати дослідження фізичних властивостей МШГ та процесу його декорування магнітними НЧ відкривають можливості створення нового класу датчиків шкідливого газу NO_2 на основі мультишарів НЧ/МШГ/Підкладка (П). Установлений вплив режимів термообробки на структурний стан та морфологію поверхні УМНЧ і шарів на основі МШГ дозволяє встановити межі температурних режимів ефективної роботи приладових наноструктур на їх основі.

Самостійне значення мають розроблені у процесі виконання роботи автоматизовані універсальні програмно-апаратні комплекси для дослідження магніторезистивних властивостей та газової чутливості, що дозволяють у режимі реального часу проводити збирання та аналіз експериментальних даних і

можуть бути використані для подальших експериментальних досліджень та у навчальному процесі СумДУ.

Особистий внесок здобувача полягає у самостійному пошуку та аналізі літературних джерел, проведенні технологічних та фізичних досліджень. Автор особисто розробив експериментальні методики, проводив вимірювання, оброблення та інтерпретацію одержаних результатів, розробив програмне та апаратне забезпечення. Самостійно провів електронографічні та електронно-мікроскопічні дослідження. Постановку задач досліджень та узагальнення результатів здійснено спільно із науковим керівником доктором фіз.-мат. наук, проф. С. І. Проценком. В обговоренні результатів досліджень брали участь доктор фіз.-мат. наук, проф. С. О. Непійко (стосовно магнітних властивостей наноструктурованих систем Ме/НЧ/П та НЧ заліза) та доктор наук, проф. Е. Майкова (стосовно властивостей газової чутливості комбінованих наноструктурованих шарів). Основні наукові результати доповідалися особисто автором на наукових семінарах та конференціях. Усі наукові положення та висновки, винесені на захист, належать автору дисертації.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові та практичні результати роботи оприлюднені та обговорені на таких конференціях: Міжнародних конференціях студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики «ЕВРИКА» (м. Львів, 2013, 2015 рр.); Міжнародній конференції “NN15” (м. Тесалонікі, Греція, 2015 р.); Міжнародній конференції «MAST 2014» (м. Більбао, Іспанія, 2014 р.); Міжнародній конференції “NANO 2015” (м. Львів, 2015 р.); Міжнародному молодіжному форумі «Радио-електроника и молодежь в XXI веке» (м. Харків, 2012 р.); науково-технічних конференціях «Фізика, електроніка, електротехніка» (м. Суми, 2012, 2013 рр.); Міжнародній кримській конференції «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. КрыМиКо» (м. Севастополь, 2012 р.); Міжнародних науково-практичних конференціях «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments» (м. Москва, Росія, 2010, 2011 рр.).

Публікації. Результати дисертації опубліковані у 18 роботах, з яких 3 статті [2, 4, 18] у фаховому виданні України та 4 статті [1, 3, 5, 17] в іноземних високорейтингових профільних наукових журналах, у т. ч. 7 статей у виданнях, що обраховуються наукометричною базою даних «Scopus» і 11 тезах доповідей [6 – 16].

Структура і зміст роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, 4 розділів, висновків та списку використаних джерел, що містить 216 посилань. Дисертацію викладено на 152 сторінках друкованого тексту, із них 93 сторінки основного тексту, ілюстровано 80 рис. і 4 табл., зокрема 39 рис. і 2 табл. на 23 окремих аркушах.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обгрунтована актуальність теми, сформульовані мета та задачі дослідження, зазначені наукова новизна та практичне значення одержаних результатів, відмічений зв'язок роботи з науковими темами та міжнародним проектом науково-технічного співробітництва. Подана також інформація стосовно апробації отриманих результатів і про особистий внесок здобувача.

У **першому розділі** «Мультишарові датчики на основі наночастинок і нанорозмірного графену (літературний огляд)» поданий огляд літературних даних стосовно методик синтезу, структурно-фазового стану, магнітних властивостей та газової чутливості наночастинок магнітних матеріалів, МШГ та нанокompозитів на їх основі. Зокрема, у *першому і другому підрозділах* узагальнюються методики синтезу магнітних НЧ феритів шпінелі та особливості отримання розчинів МШГ методом рідинного відшарування. Зроблено висновок про широкий спектр можливостей отримання НЧ і точного контролю їх розмірів та складу. Підкреслено перспективність використання відшарованого графену як дешевої альтернативи дорогому епітаксійному графену. У *третьому підрозділі* розглянуто методики формування чутливих шарів із НЧ, МШГ та нанокompозитів, їх магнітні властивості та застосування. Проаналізовано питання про вплив типу НЧ на чутливість графену до шкідливих газів.

У **другому розділі** «Методика і техніка експерименту» сформульовані основні завдання, описані методики та методи використані у роботі. Основна увага приділена отриманню упорядкованих масивів НЧ і шарів МШГ із використанням методик Ленгмюра – Блоджетт і спін-коатингу та контролю їх досконалості у процесі формування та після нанесення на масивні підкладки монокристалічного кремнію з орієнтацією (100) із природним шаром оксиду SiO_2 . Описано формування провідної металевої матриці методом термічного випаровування в умовах високого вакууму (BESTEC). Для проведення аналізу фазового складу було розроблено програмне забезпечення для аналізу дифракційних картин, отриманих методом електроннографії. Викладена методика використання раманівської спектроскопії, еліпсометрії та спектрофотометрії для дослідження оптичних властивостей та магніто-оптичного ефекту Керра (МОКЕ) для досліджень магнітооптичних властивостей. Детально описані розроблені програмно-апаратні комплекси для дослідження магніторезистивних властивостей із СІР геометрією пропускання струму, дослідження газової чутливості та проведення термообробки. Наведено методику дослідження морфології поверхні методом атомно-силової та растрової мікроскопії. Розглянуто особливості проведення досліджень магнітних властивостей окремих наночастинок.

Третій розділ «Динаміка формування, морфологічні та оптичні властивості упорядкованих масивів магнітних наночастинок Fe_3O_4 , CoFe_2O_4 , NiFe_2O_4 та нанорозмірного графену» складається з двох підрозділів.

У першому підрозділі описано особливості формування наноструктурованих шарів методом спіно-коатингу та Ленгмюра – Блоджетт. Характер розподілу масивів НЧ на поверхнях підкладок обумовлює подальші властивості наноприладових структур та окреслює область їх можливого використання. Важливими параметрами при оцінюванні та характеризації наноструктур вважають: особливості пакування та відстань між НЧ, кількість моношарів, термообробка.

Зразки для дослідження динаміки формування масивів НЧ методом спіно-коатингу було підготовлено капанням розчинів НЧ із різними концентраціями на поверхню кремнієвих (Si/SiO_2 (500 нм)) підкладок, що обертались із швидкостями 10, 25, 50, 75 об/с. Характер розподілу НЧ показав можливість утворення різноманітних наноструктур від малих нанокластерів до суцільних мереж із НЧ. Високі концентрації НЧ у розчині хлороформу приводять до формування рівномірно розподілених по поверхні підкладки мереж із НЧ навіть при високих швидкостях обертання. Збільшення швидкості обертання приводить до дефрагментації мереж і переходу до кластерних утворень.

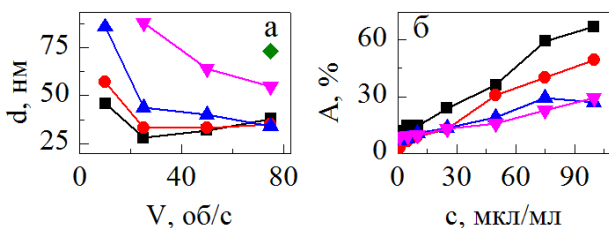


Рис. 1. Залежність розміру кластерів НЧ від швидкості обертання спіно-коатера (а) при різних концентраціях розчинів, мкг/мл: ■ – 1, ● – 5, ▲ – 10, ▼ – 25, ◆ – 50 (а); відсоток покриття поверхні підкладки НЧ (б) для різних швидкостей обертання спіно-коатера, об/с : ■ – 10, ● – 25, ▲ – 50, ▼ – 75

За постійної швидкості обертання та з підвищенням концентрації розчину розмір кластерів збільшується разом із зменшенням відстані між ними. На рисунку 1 наведено графіки залежності розмірів кластерів НЧ та відстаней між ними від швидкості обертання для кожної з концентрацій, при якій спостерігалось формування кластерних наноструктур. В усіх випадках утворені кластери представляють моношарові 2D-наноструктури із НЧ (рис. 2 а). Подібний характер притаманний сформованим ланцюжкам та мережам, зображеним на рис. 2 б, в. Найбільш якісні суцільні плівки отримують із використанням технології Ленгмюра – Блоджетт (рис. 3 а, б). Досить часто під час побудови наноприладових систем виникає необхідність у використанні комбінації різних матеріалів. У другому підрозділі розглянуто оптичні та спектроскопічні властивості сформованих наноструктур. На рисунку 4 приведені узагальнені результати вимірювань еліпсометричних констант Ψ і Δ у залежності від кількості моношарів НЧ, осаджених методом Ленгмюра – Блоджетт без та після їх термообробки.

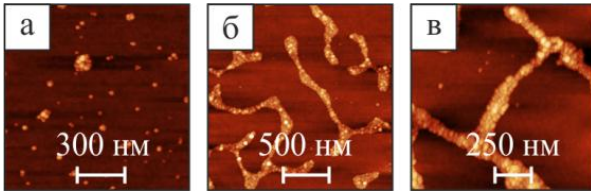


Рис. 2. Зображення, отримані методом АСМ мережесих наноструктур із НЧ: а – 2D-кластери; б – ланцюжки; в – мережі

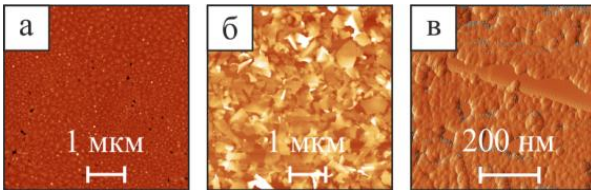


Рис. 3. Зображення одержані методом АСМ УМНЧ CoFe_2O_4 (а), МШГ (б) та мультишарів на їх основі (в)

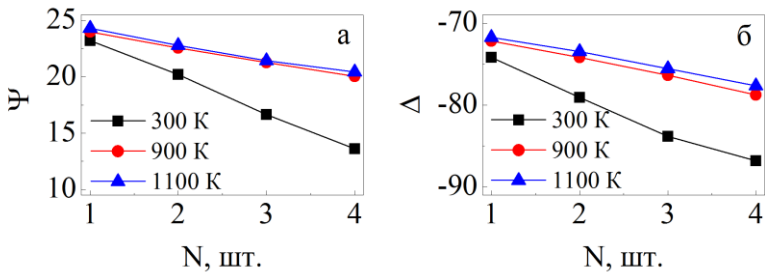


Рис. 4. Еліпсометричні константи Ψ і Δ залежно від кількості моношарів НЧ осаджених методом Ленгмюра – Блоджетт відразу після нанесення (■) та після термообробки при 900 К (●) та 1100 К (▲). Залежності побудовані при $\lambda = 600$ нм

У наших дослідженнях моношари НЧ наносили методом спін-коатингу, тоді як МШГ наносився із використанням технології Ленгмюра – Блоджетт.

Рисунок 3 в показує АСМ-зображення НЧ CoFe_2O_4 , нанесених методом спін-коатингу на шар нанорозмірного МШГ. При використанні такого підходу, шар МШГ вдалося на 80 % укрити магнітними НЧ. Еліпсометричні та спектроскопічні дослідження підтверджують ефективність термообробки при видаленні ПАВ та адсорбентів із поверхні НЧ або МШГ.

Четвертий розділ «Магніторезистивні та електрофізичні властивості наноструктурованих чутливих елементів» складається з двох підрозділів, у першому з яких наведено результати вивчення впливу структурного стану масиву НЧ, товщини та умов термообробки провідної матриці на величину магнітоопору наноструктурованих систем.

Для мінімізації протікання процесів дифузії між НЧ та провідною матрицею

температурна обробка масивів НЧ проводилася перед її нанесенням. У випадку двокомпонентних оксидних НЧ NiFe_2O_4 відпал за температури 1100 К приводить до утворення декількох фаз ($\alpha\text{-Fe}$, Ni , FeNi_3), тоді як однокомпонентні НЧ Fe_3O_4 перетворюються на НЧ $\alpha\text{-Fe}$. Наявність слідів оксидів $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ свідчить про утворення тонкої оксидної оболонки. Разом із зміною фази термообробка приводить до укрупнення НЧ, що збільшує відсоток магнітного матеріалу в окремих частинках і, як наслідок, підвищує їх магнітний момент.

Дослідження впливу товщини провідної матриці Ag на характер її розподілу по поверхні масиву НЧ після відпалювання за температури 600 К (рис. 5) показали, що при більших товщинах утворюються витягнуті фрагменти ПМ із відношенням довжини до ширини від 2:1 до 4:1. Такий характер розподілу спостерігається при товщинах ПМ більше ніж 10 нм. У випадку тонкого шару ПМ Ag утворюються переважно півсферичні кластери із середнім радіусом 30 та 50 нм для ПМ товщиною 5 та 10 нм, відповідно. Висота кластерів зростає із збільшенням товщини ПМ і складає 20, 30, 60 та 80 нм для товщин ПМ 5, 10, 15 та 20 нм відповідно. Схематичне зображення процесу формування функціональних шарів приведено на рис. 6.

Рисунок 7 а ілюструє вплив температурної обробки масивів НЧ CoFe_2O_4 у провідній матриці Ag товщиною 15 нм на магнітоопір системи. Без термообробки масиву НЧ і ПМ магнітоопір відсутній, оскільки НЧ занадто малі

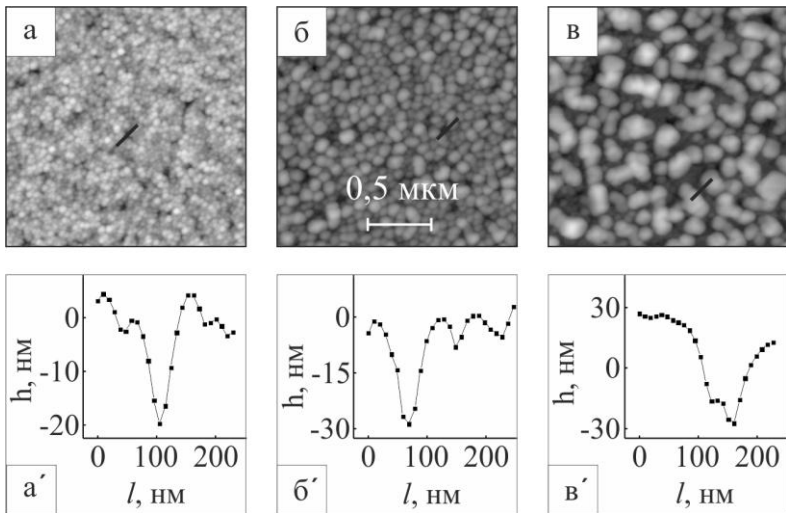


Рис. 5. Морфології поверхні зразків із товщинами ПМ Ag 5 нм (а), 10 нм (б) та 15 нм (в) після відпалювання за температури 600 К. На позиціях а', б', в' наведені відповідні профілі висоти

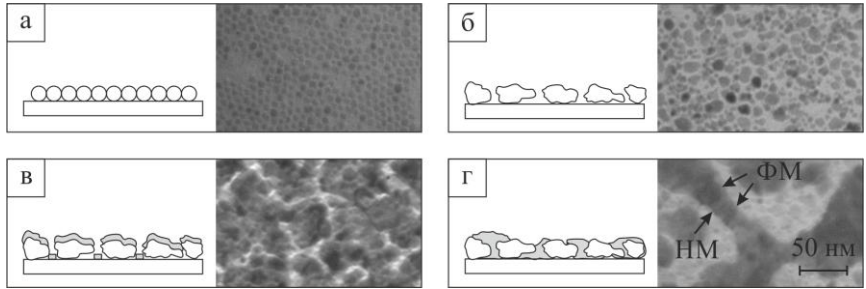


Рис. 6. Схематичне зображення процесу формування мережевої структури після відпалювання ПМ за 600 К: а – формування УМНЧ; б – відпал масиву НЧ за 1100 К; в – нанесення провідної ПМ; г – відпал сформованої наноструктури за 600 К

для набуття феромагнітних властивостей за кімнатної температури. Відпалювання масиву НЧ до 1100 К приводить до збільшення кількості феромагнітних частинок і, як наслідок, до появи магнітоопору. У результаті подальшої термообробки ПМ формуються масиви спін-вентильних переходів збільшуючи величину магнітоопору від 3 до 14 %. Рисунок 7 б ілюструє зміну величини магнітоопору на лінійній ділянці для масивів НЧ Fe_3O_4 , CoFe_2O_4 , NiFe_2O_4 , вбудованих у провідну матрицю Ag товщиною 15 нм.

Також представлені результати дослідження впливу товщини немагнітної металевої матриці Ag на зміну величини магнітоопору (рис. 8). Безпосередньо після нанесення ПМ величина магнітоопору становила 5 – 6% для систем із товщинами провідної матриці 5 і 10 нм. У той самий час системи з товщинами 15 і 20 нм показували повну відсутність впливу магнітного поля на зразок. Така поведінка ймовірно обумовлена надмірною товщиною ПМ, що приводить до повного шунтування зразка разом із спін-залежним розсіюванням електронів на НЧ. Так, наприклад, термообробка НЧ NiFe_2O_4 ($T_b = 1100$ К) та ПМ Ag ($T_b = 600$ К) приводить до збільшення величини зміни магнітоопору від 5 до 12 % для систем із товщинами 5 і 10 нм, а для 15 і 20 нм ПМ відзначена

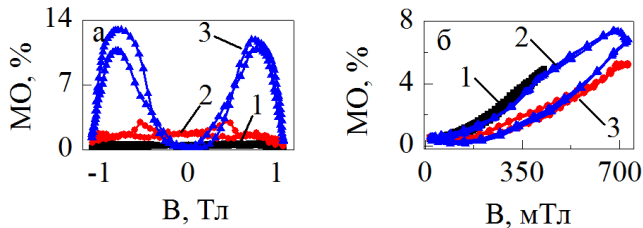


Рис. 7. Зміна МО УМНЧ CoFe_2O_4 вбудованих у ПМ Ag товщиною 15 нм (а) без відпалу (1), після відпалу за 1100 К УМНЧ (2), після відпалу при 1100 К УМНЧ і відпалу ПМ за 600 К (3) та лінійна ділянка зміни МО УМНЧ Fe_3O_4 (1), CoFe_2O_4 (2), NiFe_2O_4 (3), вбудованих у ПМ Ag товщиною 15 нм (б)

поява магнітоопору у межах 4 – 6%. Це свідчить про збільшення ефективної довжини протікання струму і відповідно зростання кількості розсіювальних взаємодій. Максимум зміни величини магнітоопору порядку 23 % був зафіксований при вимірюванні магнітоопору у зразку, що мав форму смужки $1 \times 10 \text{ nm}^2$ і товщину ПМ Ag що дорівнює 5 нм (рис. 9).

Для оцінювання внеску розсіювання електронів на магнітних моментах наночастинок у загальну величину електричного опору наноструктурованої плівки було вдосконалено феноменологічну модель електрофізичних властивостей гранульованих плівкових сплавів розроблену на кафедрі прикладної фізики СумДУ. Моделювання проводилося для наноструктур без і після термообробки провідної матриці за температури 600 К. В обох випадках

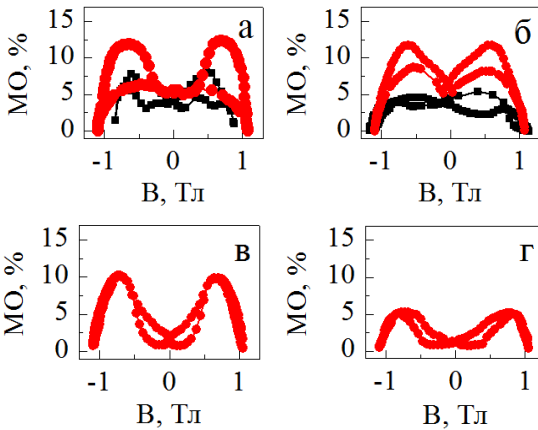


Рис. 8. Зміна МО УМНЧ NiFe_2O_4 , відпалених за 1100 К та вбудованих у ПМ Ag товщиною 5 нм (а), 10 нм (б), 15 нм (в), 20 нм (г) без (■) та після відпаду такої структури за 600 К (●). Для графіків (в) та (г) змін магнітоопору до відпаду не зафіксовано

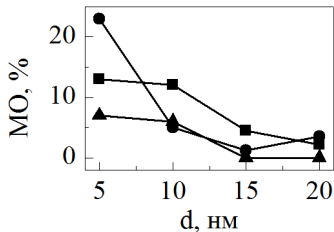


Рис. 9. Узагальнений графік залежності МО системи ПМ/ВМНЧ (NiFe_2O_4) 1100 К/П від товщини ПМ Ag без (▲), після відпаду за 600 К (■) та у разі прямокутної геометрії зразка із відношенням сторін 1:10 без відпаду ПМ Ag (●)

масив магнітних НЧ був попередньо відпалений за температури 1100 К.

Схематичні зображення відповідних плівкових систем подані на рис. 10 та 11. У першому випадку відмінність від оригінальної моделі полягає у врахуванні впливу малих товщин провідної матриці $d_{\text{ПМ}}$. У другому випадку трубки струму було представлено як послідовне з'єднання фрагментів ПМ $\Delta l_{\text{ПМ}}$ і магнітних гранул. Це дає змогу врахувати вплив надмірного шару ПМ товщиною $d_{\text{ши}}$, що утворюється після термообробки провідної матриці за

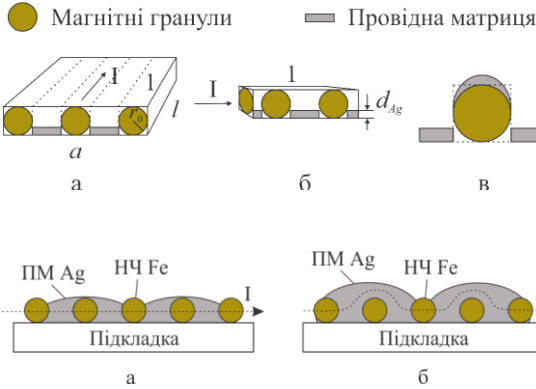


Рис. 10. Схематичне зображення УМНЧ у ПМ до проведення термообробки (а), трубки струму (б) та її поперечного перерізу (в). I – сила струму

Рис. 11. Схематичне зображення фрагментів УМНЧ у ПМ із малою (а) та великою (б) товщинами ПМ після термообробки

температури 600 К. Як результат було отримано співвідношення для питомого опору таких структур:

$$\rho = \left(\frac{\rho_z}{\pi} + \rho_{\text{ПМ}} \frac{\Delta l_{\text{ПМ}}}{2d_{\text{ПМ}}} \right) \cdot d_{\text{ПМ}} \cdot (2lr_0)^{-1}. \quad (1)$$

$$\rho = D \cdot \left[\frac{\rho_z}{\pi r_0} + \frac{\rho_{\text{ПМ}} \cdot \Delta l_{\text{ПМ}} \cdot n_f^l \cdot \left(\rho_z + \rho_{\text{ПМ}} \frac{\Delta l_{\text{НЧ}}}{r_0} \right)}{2d_{\text{ни}} \pi r_0 \cdot \left(\rho_{\text{ПМ}} \frac{\Delta l_{\text{ПМ}}}{2d_{\text{ни}}} + \frac{n_f^l}{\pi} \cdot \left(\rho_z + \rho_{\text{ПМ}} \frac{\Delta l_{\text{НЧ}}}{r_0} \right) \right)} \right] \cdot 2l^{-1}. \quad (2)$$

де $\Delta l_{\text{НЧ}}$ – відстань між магнітними гранулами; $d_{\text{НЧ}}$ – товщина надлишкового шару ПМ; n_f^l – кількість магнітних гранул або фрагментів ПМ в окремому фрагменті мережі ПМ.

При експериментальних розрахунках величини питомого опору після термообробки ПМ загальна товщина шару D визначалась експериментально методом АСМ і для початкових товщин нанесеної ПМ 5, 10, 15 і 20 нм склала 50, 60, 70 і 80 нм відповідно. Розрахункові значення, одержані за співвідношенням (2), узгоджуються (до $\pm 40\%$) з експериментально отриманими значеннями величини питомого опору зразків УМНЧ у ПМ після проведення термообробки.

Досліджувані НЧ Fe_3O_4 , NiFe_2O_4 та CoFe_2O_4 характеризуються середнім діаметром порядку 10 нм. За таких розмірів за кімнатної температури вони проявляють суперпарамагнітні властивості. Внаслідок цього при дослідженні магнітооптичних властивостей у сформованих масивах НЧ без термообробки МОКЕ-сигналу не було. Подібна поведінка зберігається також при подальшій термообробці масивів НЧ при 600 та 900 К. Одержані результати добре

корелюють із результатами досліджень термообробки масивів НЧ де їх середні розміри майже не змінні при відпалі до зазначених температур. Суттєва зміна характеру кривої гістерезису МОКЕ спостерігається у результаті укрупнення НЧ після термообробки при 1100 К (рис. 12).

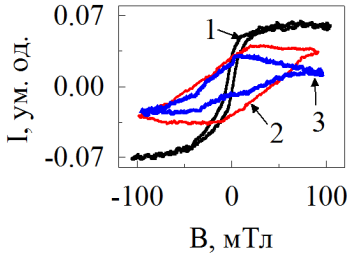


Рис. 12. Залежності МОКЕ для УМНЧ Fe_3O_4 (1), CoFe_2O_4 (2) та NiFe_2O_4 (3) після відпалу за $T_6 = 1100 \text{ K}$

Така поведінка також добре корелює із проведеними структурними дослідженнями, які вказують на формування магнітних частинок із підвищеним вмістом магнітної компоненти в оксидній оболонці.

У *другому підрозділі* подані результати досліджень електрофізичних властивостей та газова чутливість наноструктурованих шарів. Незалежно від методу формування для ефективного проведення досліджень упорядкованих масивів НЧ із їх поверхні необхідно видаляти утворені при синтезі ПАВ. Цей етап вкрай важливий під час дослідження процесів проходження струму в упорядкованих масивах НЧ, оскільки ПАВ мають високий електричний опір, що на декілька порядків перевищує опір самих НЧ. Оскільки у наших дослідженнях УМНЧ піддавалися термообробці за 1100 К, необхідно мати уявлення про характер зміни величини електричного опору, а відповідно і характер протікання електричного струму в таких системах. Відпал таких наноструктур при 1100 К приводить до зниження величини електричного опору від 4 МОм до 600 Ом, а у випадку шару МШГ – від 2 МОм до 10 кОм. Величина електричного опору знижується стрибкоподібно та не повертається до свого початкового значення після охолодження, що підтверджує видалення ПАВ. Ураховуючи таку велику зміну електричного опору, було б доцільно прослідкувати вплив високотемпературної обробки на властивості газової чутливості таких шарів. Присутність газу NO_2 можна зафіксувати навіть без відпалу шару МШГ, проте рівень шуму не дозволяє використовувати подібні шари як реальні датчики. Окрім покращення відношення сигналу до шуму та зниження величини електричного опору при збільшенні температури відпалу також спостерігається незначний спад чутливості до газу NO_2 . Це свідчить про часткове зниження кількості дефектів у площині фрагментів МШГ. Оскільки у наших експериментах величина спаду чутливості до газу NO_2 після проведення термообробки зазвичай складала не більше 2 %, то для проведення подальших експериментальних досліджень температуру відпалу рівну 1100 К було обрано як оптимальну через найменше значення відношення сигналу до шуму. Дослідження чутливості до газу NO_2 та особливості відновлення чутливих

елементів проводились за кімнатної, так і за температур 370, 420, 470 та 570 К (рис. 13).

У результаті наших досліджень було встановлено, що найбільш важливу роль при збільшенні чутливості графену до газів відіграють саме дефекти із крайовою природою. Рисунок 13 б ілюструє графіки зміни величини чутливості

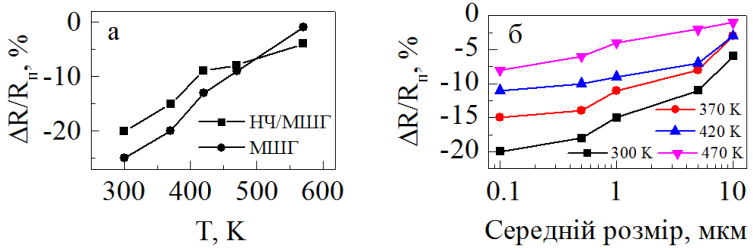


Рис. 13. Залежність чутливості від температури для півки МШГ без (а, ■) та після декорування НЧ NiFe_2O_4 (а, ●) і від чутливості від середнього розміру фрагментів МШГ за різних робочих температур (б)

при детектуванні газу NO_2 шарами на основі фрагментів МШГ різного середнього розміру. Із графіків (рис. 13 б) видно, що шар, сформований із розчину великих фрагментів МШГ (порядку 10 μm), має значно нижчу чутливість порівняно із шаром нанорозмірного МШГ (100-500 нм) та складає 6 та 20 % відповідно

Головна перевага датчиків на основі таких шарів полягає у можливості роботи за кімнатної температури порівняно із стандартними датчиками на основі оксидів напівпровідників, де відновлення відбувається нагріванням до значних температур (600 К), а в деяких випадках чутливий елемент має робочі температури, вищі ніж 470 К. Підвищення робочої температури приводить до зниження чутливості через прискорення процесів десорбції із поверхні фрагментів МШГ. У наших дослідженнях декорування поверхні МШГ наночастинками NiFe_2O_4 покращило чутливість до газу NO_2 майже на 40 % (рис. 13 а). На нашу думку, такий результат обумовлено процесами хемосорбції кисню, який виступає є додатковим центром адсорбції газу NO_2 .

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язана задача стосовно встановлення особливостей магніторезистивних, оптичних властивостей та газової чутливості упорядкованих масивів НЧ у провідній металевій матриці або мультишарового графену. Вирішене питання впливу температури відпалювання на структурно-фазовий стан наночастинок та робочі характеристики наноприладових систем на їх основі (магнітоопір, коерцитивність, газова чутливість). У роботі отримані такі наукові й практичні результати.

1. Вивчено особливості динаміки формування УМНЧ Fe_3O_4 , CoFe_2O_4 і NiFe_2O_4 та шарів МШГ на підкладках $\text{SiO}_2(500 \text{ нм}) / \text{Si}(001)$, що формувалися методами спін-коатингу та Ленгмюра – Блоджетт:

– у результаті дослідження впливу швидкості обертання спін-коатера та концентрації НЧ у розчині на їх розподіл на підкладці SiO_2 було встановлено, що збільшення швидкості обертання спін-коатера при постійній концентрації НЧ у розчині приводить до дефрагментації суцільного шару УМНЧ та формування мережевих і кластерних наноструктур;

– початок дефрагментації суцільних шарів УМНЧ, отриманих методом спін-коатингу спостерігається при значеннях концентрації НЧ у розчині від 25 до 100 мкг/мл та величини швидкості обертання спін-коатера від 10 до 75 об/хв відповідно;

– ефективне видалення поверхнево-активних речовин із поверхні сформованих УМНЧ можливе при температурній обробці при $T_B = 600 \text{ К}$, про що свідчать зміни оптичних властивостей і параметрів змочування зразків.

2. У результаті дослідження структурно-фазового стану масивів НЧ Fe_3O_4 , NiFe_2O_4 та CoFe_2O_4 після проведення температурної обробки в умовах вакууму показало, що за температури $T_B = 1100 \text{ К}$ формуються переважно НЧ із залізним ядром та оксидною оболонкою $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$.

3. На основі аналізу впливу товщини провідної немагнітної матриці Ag та її температурної обробки на магніторезистивні властивості наноприладових систем встановлено, що відпал провідної немагнітної матриці Ag за $T_B = 600 \text{ К}$ приводить до збільшення величини магнітоопору у 2-3 рази, через збільшення площі меж поділу НЧ/провідна матриця. Подальше зниження величини магнітоопору від 12 до 2% зі збільшенням товщини провідної матриці Ag від 5 до 20 нм пояснюється шунтуванням меж поділу НЧ/провідна матриця із спін-залежним розсіюванням електронів.

4. Уперше показано можливість використання шару мультишарового графену як провідної немагнітної матриці та досліджено магніторезистивні властивості наноструктур типу МШГ/МНЧ/МШГ/П. Установлено, що магнітоопір у таких системах обумовлений спін-залежним розсіюванням електронів на межах поділу фрагментів МШГ і магнітних НЧ. Після термообробки структури за температури $T_B = 1100 \text{ К}$ величина зміни магнітоопору становила порядку 3 % тоді як без термообробки зміна магнітоопору помічена не була.

5. У результаті дослідження впливу температурної обробки шару МШГ на його електрофізичні властивості було показано, що термообробка за температури $T_B = 1100 \text{ К}$ приводить до зниження величини електричного опору на 3 порядки від 2 МОм до 10 кОм та зниження чутливості до газу NO_2 майже вдвічі – від 25 до 15 %, що обумовлено видаленням ПАР та заліковуванням дефектів у площині фрагментів мультишарового графену.

6. Уперше аналізований процес декорування шару мультишарового графену масивами наночастинок NiFe_2O_4 , якій показав можливість покращення

чутливості таких структур до газу NO_2 на 40 %, що обумовлено іонсорбцією кисню на поверхні НЧ, який надалі відіграє роль додаткових центрів адсорбції молекул газу NO_2 .

7. Розрахунки на основі модифікованої феноменологічної моделі електрофізичних властивостей гранульованих плівкових сплавів підтверджують залежність магніторезистивних властивостей приладових структур типу НЧ/ПМ/П від товщини провідної матриці й умов термообробки, що добре узгоджується з експериментальними даними.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати

1. Morphological and magnetic analysis of Fe nanostructures on W(110) by using scanning tunneling microscopy and Lorentz microscopy / [E. D. Schaefer, S. V. Chernov, A. A. Sapozhnik, **D. M. Kostyuk**, A. V. Zaporozhchenko, S. I. Protsenko, M. Bode, S. A. Nepijko, H.-J. Elmers, G. Schonhense] // *Japanese Journal of Applied Physics*. – 2016. – V. 55, № 2S. – P. 02BC11–1 – 02BC11–6.

2. Магніторезистивні властивості масиву наночастинок оксиду заліза у провідній матриці / [**Д. М. Костюк**, С. І. Проценко, Л. В. Однодворець, І. В. Чешко, І. Ю. Проценко] // *Журнал нано- та електронної фізики*. – 2015. – Т. 7, № 4. – С. 04039-1 – 04039-7.

3. Reliable determination of the few-layer graphene oxide thickness using Raman spectroscopy / [**D. Kostyuk**, M. Bodik, P. Siffalovic, M. Jergel, Y. Halahovets, M. Hodas, M. Pelletta, M. Pelach, M. Hulman, Z. Spitalsky, M. Omastova, E. Majkova] // *Journal of Raman Spectroscopy*. – 2015. – V. 47, № 4 – P. 391 – 394.

4. Магніторезистивні та магнітооптичні властивості фрагментів спін-вентильних структур на основі впорядкованих масивів наночастинок Fe_3O_4 / [М. Г. Демиденко, **Д. М. Костюк**, С. І. Проценко, Н. І. Шумакова] // *Журнал нано- та електронної фізики*. – 2014. – Т. 6, № 4. – С. 04046-1 – 04046-4.

5. Magnetoresistive properties of Fe_3O_4 nanoparticles embedded in a Cu matrix / [S. A. Nepijko, H. J. Elmers, G. Schönhense, M. H. Demydenko, S. I. Protsenko, **D. M. Kostyuk**] // *Applied Physics A*. – 2013. – V. 112, № 2. – P. 463 – 467.

2. Наукові праці апробаційного характеру

6. Few-layer graphene Langmuir film decorated by Pd nanoparticles for NO_2 gas sensing / [**D. Kostyuk**, S. Luby, M. Benkovicova, P. Siffalovic, K. Vegso, J. Ivanco, M. Jergel, E. Majkova] // Book of abstracts of 12th International Conference on Nanosciences and Nanotechnologies [«NN15»], (Thessaloniki, 7 – 10 July, 2015). – Thessaloniki. – 2015. – P. 5 – 21.

7. Вплив провідної матриці Ag або Cu на характер магніторезистивних залежностей масивів наночастинок Fe_3O_4 / [**Д. М. Костюк**, С. І. Проценко, Н. І. Шумакова, О. П. Ткач] // Матеріали Міжнародної конференції студентів і

молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики [«Еврика-2015»], (Львів, 13 – 15 травня 2015 р.). – Львів : LNU, 2015. – С. А12.

8. **Костюк Д.** Магнітоопір масивів магнітних наночастинок Fe_3O_4 у провідній матриці мультишарового графену / Д. Костюк, С. Проценко // Матеріали Міжнародної конференції студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики [«Еврика-2015»], (Львів, 13 – 15 травня 2015 р.). – Львів : LNU, 2015. – С. D10.

9. **Костюк Д. М.** Етапи формування плівок графену методом Ленгмюр-Блоджетт / Д. М. Костюк, О. О. Яців, О. В. Федірко // Матеріали та програма науково-технічної конференції [«Фізика, електроніка, електротехніка, ФЕЕ-2015»], (Суми, 20 – 25 квітня 2015 р.). – Суми : СумДУ, 2015. – С. 147.

10. **Костюк Д. М.** Особливості розподілу масиву наночастинок Fe_3O_4 на вуглецевих підкладках / Д. М. Костюк, М. Г. Демиденко, С. І. Проценко // Матеріали Міжнародної конференції студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики [«Еврика-2013»], (Львів, 15-17 червня 2013 р.). – Львів : ЛНУ, 2013. – С. D10.

11. Особливості формування впорядкованих масивів наночастинок FeNi / [Д. М. Костюк, М. Г. Демиденко, А. А. Возний, О. М. Левченко.] // Матеріали та програма науково-технічної конференції [«Фізика, електроніка, електротехніка, ФЕЕ-2013»], (Суми, 22 – 27 квітня 2013 р.). – Суми : СумДУ, 2013. – С. 122.

12. **Костюк Д. М.** Дослідження впорядкованих масивів наночастинок заліза як складової частини датчиків магнітного поля / Д. М. Костюк, М. Г. Демиденко // Матеріали та програма науково-технічної конференції [«Фізика, електроніка, електротехніка, ФЕЕ-2012»], (Суми, 16 – 21 квітня 2012 р.). – Суми : СумДУ, 2012. – С. 116.

13. **Костюк Д. М.** Дослідження магнітоопору наночастинок FeO та Fe_3O_4 вбудованих у провідну матрицю Cu / Д. М. Костюк, М. Г. Демиденко, С. І. Проценко // Матеріали XVI міжнародного молодіжного форуму [«Радиоелектроника и молодежь в XXI веке»], (Харьков, 17 – 19 апреля 2012 г.). – Харьков : ХНУРЕ, 2012. – Т.1. – С. 69 – 70.

14. **Костюк Д. Н.** Магниторезистивные свойства упорядоченных массивов наночастиц Fe_3O_4 и FeO / Д. Н. Костюк, М. Г. Демиденко, С. И Проценко // Матеріали Міжнародної кримської конференції [«Crimiko-2012»], (Севастополь, 10 – 14 вересня 2012 р.). – Moscow : Weber Pub. Co., 2012. – С.739 – 740.

15. **Костюк Д. Н.** Программно-аппаратный комплекс для исследования магниторезистивных свойств в сменной геометрии поля / Д. Н. Костюк, М. Г. Демиденко, С. И. Проценко // Сборник трудов конференции [«Образовательные, научные и инженерные приложения в LabVIEW и National Instruments»], (Москва, 8 – 9 декабря 2011 г.). – Москва : РУДН, 2011. – С.493 – 495.

16. Проценко С. И. Программное обеспечение для распознавания и анализа дифракционных картин полученных методом просвечивающей

електронної мікроскопії/ С. І. Проценко, Д. Н. Костюк // Сборник трудов конференции [«Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии NationalInstruments»], (Москва, 3 – 4 декабря 2010 г.). – Москва : РУДН, 2010. – С. 87 – 90.

3. Праці, які додатково відображають наукові результати

17. Decoration of atomic steps on (001)NaCl cleavage face during deposition of preformed Ag clusters / [S. A. Nepijko, D. M. Kostyuk, S. I. Protsenko, W. Schulze, G. Schonhense] // *Applied Physics A*. – 2013. – V. 111, № 1. – P. 237 – 242.

18. Магніторезистивні властивості спін-вентильних структур на основі Co та Cu або Au / [М. Г. Демиденко, С. І. Проценко, Д. М. Костюк, І. В. Чешко] // *Журнал нано- та електронної фізики*. – 2011. – Т. 3, № 4. – С. 106 – 113.

АНОТАЦІЯ

Костюк Д. М. Фізичні властивості металевих наночастинок у провідній матриці – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем. – Сумський державний університет, Суми, 2017.

Дисертацію присвячено комплексному дослідженню магніторезистивних і оптичних властивостей та газової чутливості приладових систем на основі масивів магнітних наночастинок (НЧ) NiFe_2O_4 , CoFe_2O_4 , Fe_3O_4 у провідній немагнітній матриці Ag або мультишарового графену. У роботі проаналізовано зв'язок між структурним станом НЧ і магніторезистивними, магнітооптичними та оптичними властивостями наноприладових систем. Встановлено механізми формування масивів спін-вентильних переходів при збільшенні товщини провідної матриці Ag від 5 до 20 нм і умов її температурної обробки ($T_b = 600$ К) та їх внесок у величину магнітоопору. Експериментально вивчено характер зміни електричного опору наноструктурованих шарів від умов температурної обробки ($T_b = 1100$ К) та досліджено вплив декорування поверхні мультишарового графену масивами НЧ NiFe_2O_4 для покращення чутливості до шкідливого газу NO_2 на 40 %. Результати досліджень можуть бути використані як практичні рекомендації при побудові наноструктурованих чутливих елементів датчиків різного функціонального призначення.

Ключові слова: наночастинки, мультишаровий графен, магнітоопір, гранульовані системи, газова чутливість, магнітооптичний ефект Керра.

АННОТАЦИЯ

Костюк Д. М. Физические свойства металлических наночастиц в проводящей матрице. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – физика приборов, элементов и систем. – Сумский государственный университет, Сумы, 2017.

Диссертация посвящена комплексному исследованию магниторезистивных и оптических свойств, газовой чувствительности приборных систем на основе массивов магнитных наночастиц (НЧ) NiFe_2O_4 , CoFe_2O_4 , Fe_3O_4 в проводящей немагнитной матрице Ag или мультислойного графена (МСГ). В работе изучены особенности и условия формирования двухмерных наноструктур из наночастиц и мультислойного графена на подложках SiO_2 (500 нм) / Si (001) с использованием методик спин-коатинга и Ленгмюра – Блоджетт. Проанализирована связь между структурным состоянием НЧ и магниторезистивными, магнитооптическими и оптическими свойствами наноприборных систем. Установлены зависимости оптических параметров от характера распределения массивов наночастиц или фрагментов МСГ на подложке. Установлены механизмы формирования массивов спин-вентильных переходов при увеличении толщины проводящей матрицы Ag от 5 до 20 нм и условий ее температурной обработки ($T_0 = 600$ К) и их вклад в величину магнитосопротивления. Разработана теоретическая модель, позволяющая оценить величину вклада рассеивания электронов на ферромагнитных частицах в электрическое сопротивление массивов магнитных наночастиц в проводящей матрице Ag до и после её термообработки ($T_0 = 600$ К). Экспериментально изучен характер изменения электрического сопротивления наноструктурированных слоев от условий температурной обработки ($T_0 = 1100$ К) и исследовано влияние декорирования поверхности мультислойного графена массивами наночастиц NiFe_2O_4 для улучшения чувствительности к вредному газу NO_2 на 40 %, а также предложен механизм взаимодействия чувствительного материала приборных структур и газа NO_2 . Исследовано влияние температуры ($T_0 = 1100$ К) на величину газовой чувствительности МСГ и установлены оптимальные условия термообработки для получения наиболее эффективных чувствительных элементов с минимальным уровнем шума. Изучено влияние размеров фрагментов МСГ на газовую чувствительность датчиков на их основе. Результаты исследований могут быть использованы как практические рекомендации при построении наноструктурированных чувствительных элементов датчиков разного функционального назначения.

Ключевые слова: наночастицы, мультислойный графен, магнитосопротивление, гранулированные системы, газовая чувствительность, магнитооптический эффект Керра.

ABSTRACT

Kostyuk D. M. Physical properties of metallic nanoparticles in conductive matrix. – Manuscript.

Thesis for the degree candidate of physical and mathematical sciences, specialty 01.04.01 – physics of devices, elements and systems. – Sumy State University, Sumy, 2017.

The thesis is devoted to the complex investigation of magnetoresistive and optical properties and sensitivity to gases of instrumentation systems based on arrays

of nanoparticles (NP) NiFe_2O_4 , CoFe_2O_4 , Fe_3O_4 in Ag conductive matrix or multilayered graphene. In this work an interconnection between the structural features of the NP and magnetoresistive, magneto-optical and optical properties of instrumentation systems was analyzed. The mechanisms of formation of arrays of spin-valve junctions while increasing the thickness of Ag conductive matrix from 5 to 20 nm, conditions of its temperature treatment and their influence on the value of magnetoresistance were established. Electrical resistance changes of nanostructured layers depends on conditions of thermal treatment ($T_t = 1100$ K) were experimentally studied and an effect of decoration of multilayered graphene by arrays of NiFe_2O_4 NPs for increasing of sensitivity to NO_2 gas by 40% was investigated. The results of research can be utilized as practical recommendation while develop the nanostructured sensitive elements of the sensors with different functional purposes.

Key words: nanoparticles, multilayered graphene, magnetoresistance, granulated systems, sensitivity to gases, magneto-optical Kerr effect.

Підписано до друку 15.02.2017.

Формат 60x90/16. Ум. друк. арк. 1,1. Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 100 пр. Зам. №_____

Видавець і виготовлювач

Сумський державний університет,

вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.