

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Демиденко Максим Геннадійович

УДК 537.621.3; 535.511; 532.582.7

**МАГНІТОРЕЗИСТИВНІ ТА ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СПІН-
ВЕНТИЛЬНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ Co, Fe, Cr I Cu ТА
НАНОЧАСТИНОК ОКСИДІВ Fe**

01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Суми – 2012

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Сумському державному університеті Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

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

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Равлік Анатолій Георгійович,
Національний технічний університет «ХПІ» (м. Харків),
професор кафедри фізики металів та напівпровідників;

доктор фізико-математичних наук, професор
Погребняк Олександр Дмитрович,
Сумський державний університет,
в.о. завідувача кафедри наноелектроніки.

Захист відбудеться 14 вересня 2012 р. о 14 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.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Сумського державного університету за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2.

Автореферат розіслано «10» серпня 2012 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

В.О. Журба

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Останніми роками інтенсивно розвиваються технології отримання періодичних та впорядкованих наноструктурованих систем, до яких, безумовно, належать багат шарові плівкові структури, спін-вентильні системи та ансамблі наночастинок (НЧ). Значну увагу дослідники приділяють методиці отримання впорядкованих дво- і тривимірних ансамблів магнітних НЧ. Двовимірні масиви магнітних частинок без дефектів і пор можуть використовуватися для синтезу нових матеріалів з унікальними властивостями. Наприклад, магнітні властивості НЧ цікаві з точки зору їх використання для розроблення ультращільних носіїв інформації, нових приладів медичної діагностики та нанороботів для точкової доставки ліків. Тривимірні ансамблі НЧ використовуються для формування контактних стовпчиків при створенні нових багат шарових мікроелектронних структур різного ступеня інтеграції та протяжності. Велика кількість досліджень, проведених останнім часом, була присвячена методикам отримання впорядкованих дво- та тривимірних бездефектних ансамблів НЧ. У той самий час дослідження з вивчення електрофізичних, магніторезистивних та магніто-оптичних властивостей (магніто-оптичний ефект Керра) практично відсутні.

Одним із перспективних напрямів у приладобудуванні є освоєння нових методик для формування чутливих елементів сенсорики і спітроніки. Такі приладові структури, як спін-вентилі, давно вивчаються дослідниками, проте залишається невирішеним питання стосовно оптимальних умов їх роботи, наприклад, температурного впливу. Тому постає проблема збереження структури тонкоплівкових чутливих елементів, лінійності та зворотності їх характеристик. Велику перспективу має використання у спін-вентильних системах впорядкованих ансамблів НЧ замість чутливих магнітних шарів. Із вищезазначеного випливає актуальність тематики даної роботи та напряму проведення досліджень.

У зв'язку з цим основним змістом даної роботи є вивчення магніторезистивних, магнітооптичних, оптичних та структурних властивостей (магнітоопір (МО), коерцитивність, структура, морфологія поверхні, фазові перетворення), впорядкованих масивів НЧ, систем металева плівка/НЧ/підкладка та спін-вентилів залежно від температури та геометрії вимірювання у зовнішньому магнітному полі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі прикладної фізики Сумського державного університету. Основні результати були отримані у ході виконання держбюджетної НДР «Формування кристалічної структури і електрофізичних властивостей плівкових матеріалів на основі багат шарових металевих наносистем» № 0106U001942 (2006-2008 рр.); проекту «Віддалено-контрольована

лабораторія для дослідження фізичних властивостей матеріалів із спін-залежним розсіюванням електронів» у рамках науково-технічного співробітництва між Сумським державним університетом та університетом м. Марибор, (Словенія), договір № М/54-2009 від 06.03.2009 р. (2009-2010 рр.); держ-бюджетної НДР «Електрофізичні і магніторезистивні властивості нанорозмірних плівкових матеріалів із спін-залежним розсіюванням електронів», № 0112U001381 (2012-2014 рр.).

Мета і задачі досліджень. Основна мета даної роботи полягала у дослідженні особливостей дифузійних процесів, магнітооптичних, оптичних та магніторезистивних властивостей багат шарових плівкових систем на основі Co, Fe, Cr і Cu та вивченні особливостей формування впорядкованих масивів наночастинок як складової спін-вентильних систем. Для досягнення поставленої мети необхідно було розв'язати такі наукові задачі:

- розробити автоматизовані комплекси для дослідження магніторезистивних та магнітооптичних властивостей, а також відповідного програмного забезпечення для керування системами збору, обробки та аналізу інформації;
- дослідити процес формування впорядкованих масивів наночастинок, їх фазовий склад та структурні особливості наноструктурованих поверхонь;
- дослідити вплив дифузійних процесів та утворення гранульованого твердого розчину у системах Co/Cu та Co/Au на магніторезистивні властивості спін-вентильних приладових систем у широкому інтервалі температур;
- проаналізувати вплив формування дво- та тривимірних ансамблів НЧ магнітних матеріалів у немагнітній провідній матриці на робочі характеристики (магнітоопір та коерцитивність) наноструктурованих приладових систем на основі наночастинок оксидів Fe.

Об'єкт дослідження – розмірні та температурні ефекти в магніторезистивних, магнітооптичних і оптичних властивостях та процеси фазоутворення у приладових спін-вентильних системах на основі плівок металів та наночастинок.

Предмет дослідження – процеси дифузії, магнітоопір, магнітооптичний ефект Керра та ступінь поляризації у приладових спін-вентильних системах на основі плівок Co, Fe, Cr, Cu та наночастинок оксидів Fe.

Методи дослідження: вакуумна пошарова конденсація металів, формування ансамблів НЧ із розчинів, просвічуюча електронна мікроскопія і електронографія, еліпсометрія, вимірювання поздовжнього магнітооптичного ефекту Керра, чотириточковий метод вимірювання магнітоопору, комп'ютерне моделювання та чиселовий розрахунок параметрів проміжних шарів у багат шарових плівкових системах у процесі дифузії.

Наукова новизна отриманих результатів. Дослідження особливостей формування, магніторезистивних, магнітооптичних, оптичних властивостей

багатошарових плівкових систем, НЧ і спін-вентильних систем дозволило отримати такі наукові результати.

1. Встановлено вплив об'ємної концентрації НЧ у розчині на особливості формування впорядкованих масивів та вивчено структурно-фазовий стан наночастинок Fe_3O_4 та FeO залежно від температури відпалювання та умов отримання. З'ясовано, що після відпалювання наночастинок, сформованих на поліімідній підкладці, збільшуються із зміною фазового стану за схемами $\text{FeO} + \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3 + \alpha\text{-Fe}$ та $\text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 + \alpha\text{-Fe}$.

2. Уперше проведено дослідження магніторезистивних властивостей упорядкованих масивів НЧ оксидів Fe у провідній матриці залежно від температури обробки та геометрії вимірювання. Для систем із наночастинками $\text{FeO} + \text{Fe}_3\text{O}_4$ та Fe_3O_4 максимальне значення магнітоопору становить 1,2% та 1,8% після відпалювання до температури 600 К та 750 К відповідно. При зміні геометрії магнітного поля фіксується характерний мінімум на кутових залежностях магнітоопору, що пов'язаний із напрямом осі легкого намагнічування системи НЧ. Після відпалювання мінімум зміщується відповідно до фазових змін у НЧ.

3. Уперше запропонована модель для розрахунку параметрів проміжних шарів приладових спін-вентильних систем на основі даних, отриманих методом нуль-еліпсометрії з використанням генетичного алгоритму. На основі аналізу оптичних та магніторезистивних властивостей спін-вентильних систем встановлено, що у ході відпалювання утворення проміжних шарів твердих розчинів значно зменшує величину магнітоопору з 1,5-1,6 до 0,4-0,6% для спін-вентилів із немагнітним прошарком Cu. У випадку немагнітного прошарку Au утворення твердого розчину має обмежений характер і тому помітно не впливає на величину магнітоопору спін-вентильних систем.

Практичне значення результатів

1. Методика формування впорядкованих масивів НЧ може бути використана при створенні наноструктурованих поверхонь.

2. Дослідження магніторезистивних властивостей на прикладі систем плівка металу/НЧ/підкладка дозволили запропонувати використання двовимірних ансамблів магнітних НЧ як чутливих елементів спін-вентилів.

3. Результати дослідження впливу температури на робочі характеристики приладових спін-вентильних систем дозволяють визначити діапазон робочих температур та правильно інтерпретувати фізичні процеси, що відбуваються у системах при нагріванні.

4. Самостійне значення мають розроблені у процесі виконання роботи автоматизовані програмно-апаратні комплекси у варіанті віддалено-контрольованої лабораторії для дослідження магніторезистивних та оптичних властивостей, що дозволяють у режимі реального часу проводити керування процесом вимірювання та обробку експериментальних даних. Розроблене програмне за-

безпечення з використанням генетичного алгоритму (ГА) та розрахункового кластера для обробки експериментальних даних, отриманих методами еліпсометрії, може використовуватися для розрахунку оптичних параметрів та товщини як кожного шару багат шарової плівкової системи, так і проміжних шарів, сформованих у результаті твердофазних реакцій.

Особистий внесок здобувача полягає у самостійному пошуку та аналізі літературних джерел, проведенні технологічних та фізичних досліджень. Автор особисто розробляв експериментальні методики, проводив вимірювання, обробку та інтерпретацію отриманих результатів, розробив програмне забезпечення та здійснив комп'ютерні розрахунки і моделювання. Самостійно проводив електроннографічні та електронно-мікроскопічні дослідження. Постановку задач досліджень і узагальнення результатів здійснено спільно з науковим керівником д-м. фіз.-мат. наук, доц. С.І. Проценком. В обговоренні результатів досліджень брали участь д-р. фіз.-мат. наук, проф. С.О. Непійко (стосовно магнітних властивостей наноструктурованих систем Me/НЧ/П) та д-р. наук, проф. Е. Майкова (стосовно магніторезистивних властивостей у приладових спін-вентильних системах). Особисто автором підготовлено тексти статей [2, 5, 6, 10, 13, 14] і тез доповідей [8, 9, 19-21], розроблено програмне забезпечення і здійснено комп'ютерне моделювання процесу утворення проміжних 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 і обговорені на таких конференціях: Міжнародній конференції “Verhandlugen Ф” (м. Берлін, Німеччина, 2012 р.); Міжнародній Кримській конференції «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. КрыМиКо» (м. Севастополь, 2010 р.); Міжнародній конференції “NAP-2011” (м. Алушта, 2011 р.); Міжнародній конференції “NEET-2011” (м. Закопане, Польща, 2011 р.); Міжнародній конференції «ICL-2009» (м. Філах, Австрія, 2009 р.); Міжнародних науково-практичних конференціях «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments» (м. Москва, Росія, 2009, 2010, 2011 рр.); Міжнародній конференції “HighMatTech” (м. Київ, 2009 р.); Міжнародній конференції «Фізичні явища в твердих тілах» (м. Харків, 2009 р.); Міжнародній конференції «Electronic Processes in Organic and Inorganic Materials» (м. Івано-Франківськ, 2010 р.); Міжнародній конференції молодих науковців «Фізика низьких температур» (м. Харків, 2010 р.); Міжнародній конференції молодих учених і аспірантів «ІЕФ-2011» (м. Ужгород, 2011 р.); Міжнародних конференціях студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики «ЕВРИКА» (м. Львів, 2008, 2010, 2011 рр.); ІІ науковому семінарі «Сучасні проблеми наноелектроніки» (м. Суми, 2011 р.); науково-технічних конференціях викладачів,

співробітників, аспірантів і студентів фізико-технічного факультету та факультету електроніки та інформаційних технологій Сумського державного університету (м. Суми, 2010, 2011, 2012 рр.); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Сучасне навчальне обладнання: інновації, технології, досвід» (м. Суми, 2010 р.).

Публікації. Результати дисертації опубліковані у 21 роботі, серед яких 5 статей [1-5] – у фахових наукових журналах, 7 статей – у матеріалах конференцій [6, 9, 10, 13, 14, 16, 19] та 9 – у тезах доповідей [7, 8, 11, 12, 15, 17, 18, 20, 21].

Структура і зміст роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, 4 розділів, висновків та списку використаних джерел, що містить 169 посилань, 4 додатків. Дисертацію викладено на 169 сторінках друкованого тексту, із них 92 сторінки основного тексту, ілюстровано 78 рис. і 11 табл., у т.ч. 55 рис. і 8 табл. на 48 окремих аркушах.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми, сформульовані мета та задачі дослідження, зазначені наукова новизна та практичне значення отриманих 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** «Особливості формування, структурні та магнітні властивості спін-вентильних систем і наночастинок (літературний огляд)» представлений огляд літературних даних стосовно методики отримання, особливостей формування, структурно-фазового стану та магнітних властивостей (магнітоопір та намагніченість) спін-вентильних систем та масивів наночастинок магнітних матеріалів. Зокрема, у *першому підрозділі* аналізуються особливості ефекту гігантського магнітоопору у багат шарових спін-вентильних системах та гранульованих сплавах. Узагальнено результати стосовно впливу гранулярного стану на магніторезистивні властивості спін-вентильних систем і зроблено висновок про перспективність використання наночастинок магнітних матеріалів як чутливих шарів спін-вентилів. У *другому підрозділі* проаналізовано методики отримання наночастинок, їх структурно-фазовий стан та магнітні властивості. Проаналізовано питання про зміни магнітних властивостей частинок при зміні їх розмірів.

У **другому розділі** «Методика і техніка експерименту» спочатку сформульовані основні завдання, описані методики і методи, що були використані у роботі. Основна увага приділена методикам отримання спін-вентильних систем у високому (установка ВУП-5М) та надвисокому вакуумі (установка UVS-500 Balzers), отриманню впорядкованих масивів наночастинок на полімерній підкладці (для дослідження структурно-фазового стану методом

просвічуючої електронної мікроскопії) та на масивних підкладках із монокристалічного кремнію з орієнтацією (100) із природним приповерхневим шаром оксиду SiO₂. Для проведення аналізу фазового стану було розроблено програмне забезпечення для розшифрування дифракційних картин, отриманих методом електроннографії. Викладена методика використання методу еліпсометрії для дослідження оптичних властивостей та метод магніто-оптичного ефекту Керра (МОКЕ) для досліджень магнітооптичних властивостей. Детально описані розроблені програмно-апаратні комплекси для дослідження магніторезистивних властивостей спін-вентильних систем з СРР (current perpendicular to plane) геометрією, де струм перпендикулярний до площини підкладки, та СІР (current in plane) геометрії, де струм проходить у площині зразка, при зміні напрямку магнітного поля та оптичних властивостей спін-вентильних систем. Описано методику дослідження морфології поверхні методом атомно-силової мікроскопії.

Третій розділ «Дифузійні процеси та оптичні властивості у спін-вентильних приладових системах на основі плівок Co, Fe, Cr та Cu» складається з п'яти підрозділів.

У *першому підрозділі* описано алгоритм розрахунку оберненої задачі еліпсометрії з використанням генетичного алгоритму. Оскільки при вивченні магніторезистивних властивостей спін-вентильних систем дуже важливим є знання їх структурно-фазового стану і розуміння процесів, які відбуваються при конденсації та термообробці, було проведено вивчення структурно-фазових перетворень неруйнівним методом еліпсометрії. Цей метод дозволяє отримати головний азимут Ψ і різницю фаз Δ . Розв'язуючи обернену задачу еліпсометрії за відомими експериментальними значеннями Ψ та Δ , можна визначити такі параметри системи, як товщину та показник заломлення окремого шару багатошарової плівкової системи. Оскільки може бути велика кількість розв'язків, то для пошуку найбільш імовірних та фізичних найкраще використовувати генетичний алгоритм. Генетичний алгоритм – це адаптивний метод пошуку, який останнім часом широко використовується для розв'язування задач оптимізації.

Для розв'язування оберненої задачі еліпсометрії з використанням ГА було розроблене програмне забезпечення, яке детально описано у *другому підрозділі*. Головна стратегія алгоритму – це пошук таких параметрів моделі, при яких параметр *cost function* буде мати мінімальне значення. На першому етапі необхідно згенерувати набори початкових випадкових популяцій у кількості, зазначеній користувачем, лише для тих параметрів, для яких задана необхідність пошуку. Особливістю цього етапу є те, що початкові випадкові популяції параметрів можуть за необхідності генеруватися у вузькому діапазоні (*min-max*), заданому для кожного параметра окремо. У такому випадку значення згенерованих параметрів знаходяться поруч із можливими розв'язками, і час на пошук розв'язку зменшується. Проте існує можливість задати довільні

початкові параметри, що призводить до збільшення часу пошуку, але якщо точно не відома модель досліджуваного об'єкта, то такий підхід буде найоптимальнішим. Далі сформований двовимірний масив параметрів передається у підпрограму розрахунку параметра *cost function*, яка знаходить окремо для кожної згенерованої популяції максимальні похибку і відхилення від заданої моделі. Загальне співвідношення, запропоноване нами для знаходження величини *cost function*, може бути подане у такому вигляді:

$$\text{cost function} = A(|\Delta - \Delta_{\text{експ}}|)^{n_1} + B(|\Psi - \Psi_{\text{експ}}|)^{n_2} + C(|\Delta n|)^{n_3} + D(|\Delta k|)^{n_4} + E(|\Delta d|)^{n_5}, \quad (1)$$

де *cost function* – сумарні похибка і відхилення згенерованої популяції стосовно заданої моделі і зазначених експериментальних значень $\Psi_{\text{експ}}$ і $\Delta_{\text{експ}}$; Ψ , Δ , n , k , d – розрахункові параметри головного азимута, різниці фаз, показника заломлення $n+ik$ та товщини шару; A , B , C , D , E та показники степенів n_1 , n_2 , n_3 , n_4 , n_5 – вагові параметри, які задають величину внеску в сумарну *cost function* відхилення розрахункових параметрів Ψ і Δ від експериментальних значень $\Psi_{\text{експ}}$ і $\Delta_{\text{експ}}$ та відхилення розрахункових параметрів n , k та d від інтервалів $n_{\min} - n_{\max}$, $k_{\min} - k_{\max}$, $d_{\min} - d_{\max}$.

Далі серед усіх згенерованих популяцій вибирається найкраща (з мінімальним значенням *cost function*), і на основі неї ГА формує новий набір популяцій параметрів шляхом мутації, заміщення та рекомбінації. При цьому нові популяції потрапляють у підпрограму розрахунку *cost function*, і далі ведеться розрахунок по колу. Критерієм зупинки розрахунку може бути зменшення *cost function* нижче граничного (наприклад, менше 10^{-10} залежно від значень вагових параметрів, які входять у *cost function*) або зупинка на вимогу користувача. Змінюючи вагові параметри *cost function*, можна впливати на процес пошуку розв'язку і за необхідності змінювати той чи інший розрахунковий параметр, що більше впливає на кінцеву сумарну *cost function*. Необхідно відмітити, що для розрахунку та знаходження параметрів спінівентильних систем використовувалися табличні дані показника заломлення $n+ik$ для масивних зразків залежно від довжини хвилі. Це обумовлює незначну природну розбіжність (на рівні 5%) розрахункових значень $n+ik$ для плівкових зразків від табличних значень для масивних зразків.

Третій підрозділ присвячено аналізу впливу товщини немагнітного прошарку спінівентильної системи на оптичні властивості з використанням нуль-еліпсометрії. На рис. 1 наведені отримані експериментальні значення Δ і Ψ при дослідженні спінівентильних систем Au/Co/Cu/Co/SiO₂/Si та модель розрахункового стека багатошарової плівкової структури, яка використовувалася для пошуку розв'язків за допомогою розробленого нами програмного забезпечення. У ході розрахунку було отримано величину товщини та показників заломлення для кожного шару спінівентильної системи.

про незначні дифузійні процеси та твердофазні реакції, які відбувалися у даних системах. Зі збільшенням температури відпалювання до 900 К відбувається різка зміна еліпсометричних кутів Δ (більше ніж на 20%) і Ψ (більше ніж на 50%), що свідчить про значні зміни у структурно-фазовому стані спін-вентильних систем. У випадку збільшення температури відпалювання до 900 К та/або збільшення товщини проміжного шару Cu (від 6 до 12 нм) відбувається більш помітна зміна оптичних параметрів: Δ на $2,25^\circ$ (7,26%) і Ψ на $0,48^\circ$ (9,44%), ніж у випадку менших температур відпалювання та товщини прошарку Cu. Оскільки у спін-вентильних системах Au(4)/ Co(3)/ Cu(6-12)/ Co(20)/ SiO₂/ Si об'ємна частка Co превалює, то суттєві зміни оптичних параметрів Δ та Ψ при температурі відпалювання, близькій до 900 К, свідчать про те, що збільшення товщини проміжного шару Cu приводить до утворення більшої об'ємної частки твердого розчину (Cu, Co), що і впливає на оптичні характеристики досліджуваних спін-вентилів. При температурі 900 К утворюється твердий розчин по усьому об'єму зразка.

Аналізуючи експериментальні результати, наведені на рис. 2, була здійснена спроба промоделювати, зробити оцінку та знайти точні значення параметрів, що характеризують тверді розчини, які є проміжними шарами між компонентами спін-вентильних систем.

На рис. 3 показана модель процесу утворення проміжних шарів твердого розчину у процесі відпалювання залежно від температури нагрівання.

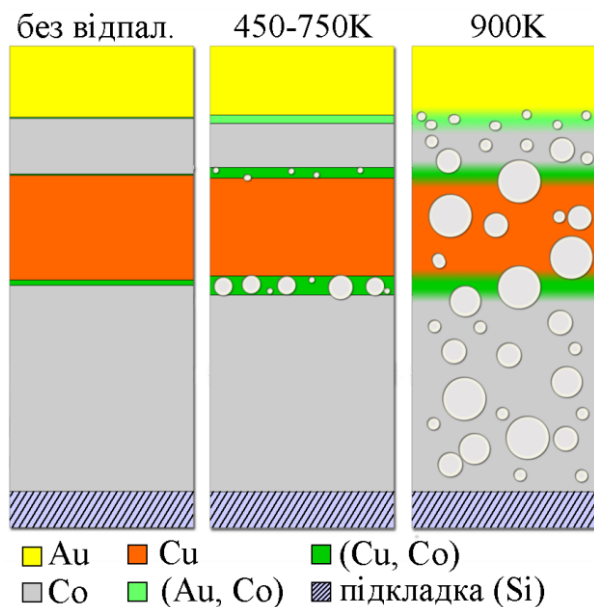


Рис. 3. Модель утворення проміжних шарів гранульованих твердих розчинів (Cu, Co) з необмеженою розчинністю та (Au, Co) з обмеженою розчинністю у процесі термічного відпалювання

Дана модель була використана як алгоритм для розробленого програмного забезпечення при розрахунку параметрів проміжних шарів багатошарових плівкових систем. Суть розрахунків за допомогою розробленого програмного забезпечення зводилася до розв'язування оберненої задачі еліпсометрії із використанням моделі Парата та ГА.

Для вивчення особливостей дифузійних процесів, утворення проміжних шарів та для розрахунку їх оптичних параметрів спін-вентильних систем Au/ Co/ Cu/ Co/ SiO₂/ Si були використані такі співвідношення:

$$n_l = \frac{(N_g + 1 - l) \cdot n_i + l \cdot n_j}{(N_g + 1)}, \quad (3.3)$$

$$k_l = \frac{(N_g + 1 - l) \cdot k_i + l \cdot k_j}{(N_g + 1)}, \quad (3.4)$$

де l – номер проміжного підшару ($l=1, \dots, N_g$); N_g – загальна кількість підшарів; n_i і k_i та n_j і k_j – оптичні параметри верхнього (i) та нижнього (j) плівкових шарів.

Із отриманих результатів можна зробити висновок про збереження індивідуальності шарів спін-вентильної системи до температури відпалювання 750 К, але спостерігаються розмиття інтерфейсів та утворення проміжних шарів твердих розчинів Cu-Co та Au-Co з максимальною товщиною 4 нм. При збільшенні температури відпалювання до 900 К індивідуальність шарів не зберігається, а відбувається утворення твердого розчину (Cu, Co) у всьому об'ємі спін-вентильної системи.

Як можна бачити, дифузійні процеси, що відбуваються між компонентами спін-вентильних систем з утворенням проміжних шарів твердих розчинів, впливають на оптичні параметри плівкової системи у цілому. У зв'язку з цим було проведено дослідження впливу дифузійних процесів на магнітооптичні властивості структур, в яких уже на стадії конденсації відбуваються активні процеси дифузії (*п'ятій підрозділ*). Як зразки для дослідження було вибрано плівкову систему Cr(5)/Fe(5), у якій ефективна товщина феромагнітного шару співрозмірна з ймовірним діаметром НЧ, що в подальшому було до деякої міри використано при дослідженні систем, у яких як феромагнітний шар використовуються наноструктуровані масиви впорядкованих НЧ магнітних оксидів Fe.

Для вивчення магнітооптичних властивостей було використано метод МОКЕ. Ефект полягає у зміні поляризації світла при відбитті від поверхні речовини при дії зовнішнього магнітного поля. Вимірюючи ступінь поляризації, можна отримати інформацію про величину намагніченості, рухливості доменної структури та магнітної анізотропії у досліджуваних системах.

З метою вивчення дифузійних процесів, які відбуваються при термообробці, проводилося дослідження оптичних параметрів плівкових систем Cr/Fe за допомогою методу нуль-еліпсометрії до та після відпалювання при температурах 400, 500, 600, 700 К. У результаті були отримані експериментальні значення Δ і Ψ був проведений розрахунок оптичних параметрів і товщини кожного шару даної багатошарової системи. Як видно з рис. 4, на якому наведено температурні залежності кутів поляризації, термічна обробка впливає на оптичні властивості системи, про що свідчить зміна Δ і Ψ та сигналу МОКЕ. У результаті дослідження плівкової системи методом МОКЕ були отримані гістерезисні криві для кутів повороту зразка 0, 45 та 90° до та після термообробки (рис. 4 б), з яких видно, що після термообробки

спостерігається значне збільшення коерцитивності системи, що також підтверджує інтенсивний перебіг дифузійних процесів в об'ємі зразка.

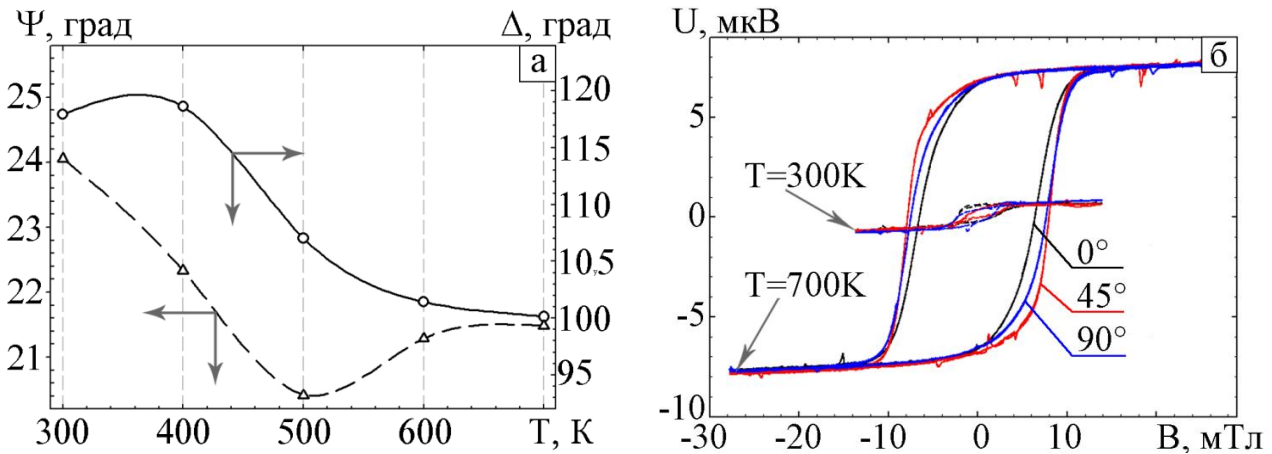


Рис. 4. Залежність зміни кутів поляризації від температури відпалювання (а) та магнітооптичного ефекту Керра для системи Cr(5)/Fe(5)/П до та після відпалювання $T=700\text{K}$ (б)

Четвертий розділ «Магніторезистивні властивості наноструктурованих та спін-вентильних систем на основі плівок Co, Cu і Au та наночастинок оксидів Fe» складається з двох підрозділів, у першому з яких наведено результати вивчення впливу геометрії вимірювання на величину магнітоопору спін-вентильних систем. Для цього були виготовлені зразки спін-вентильних систем у вигляді нанодротів діаметром 200-1000 нм (рис. 5).

У ході експериментального дослідження магніторезистивних властивостей спін-вентильних систем також були досліджені плівкові системи при CPP геометрії вимірювання: Au(1)/Co(3)/Au(6)/Co(20)/SiO₂/Si (спін-вентиль №1); Au(1)/Co(3)/Cu(6)/Co(20)/SiO₂/Si (спін-вентиль №2); Au(1)/Co(20)/Au(6)/Co(3)/SiO₂/Si (спін-вентиль №3); Au(1)/Co(20)/Cu(6)/Co(3)/SiO₂/Si (спін-вентиль №4) залежно від орієнтації зовнішнього магнітного поля.

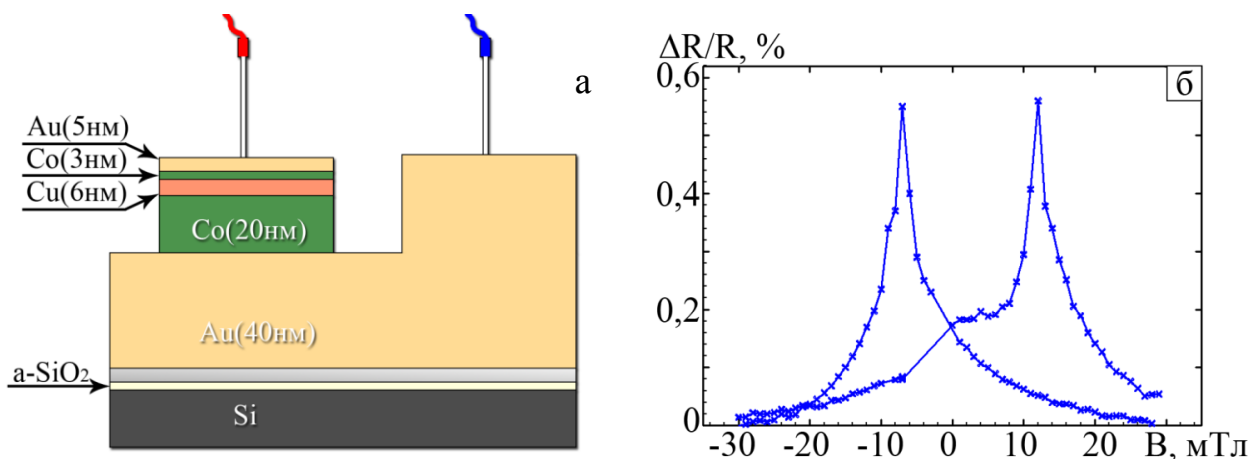


Рис. 5. Схематична будова (а) та зміна магнітоопору (б) спін-вентильних систем при CPP геометрії вимірювання

Характерними особливостями отриманих результатів дослідження є те, що величина зміни магнітоопору практично не залежить від кута α в інтервалі $\alpha=0-70^\circ$. У той самий час у діапазоні $70-90^\circ$ величина МО різко зменшується у випадку спін-вентилів №1-3 або, навпаки, – різко збільшується для спін-вентиля №4. Це ілюструється залежностями МО від величини B при різних кутах її орієнтації стосовно площини підкладки (рис. 6 а).

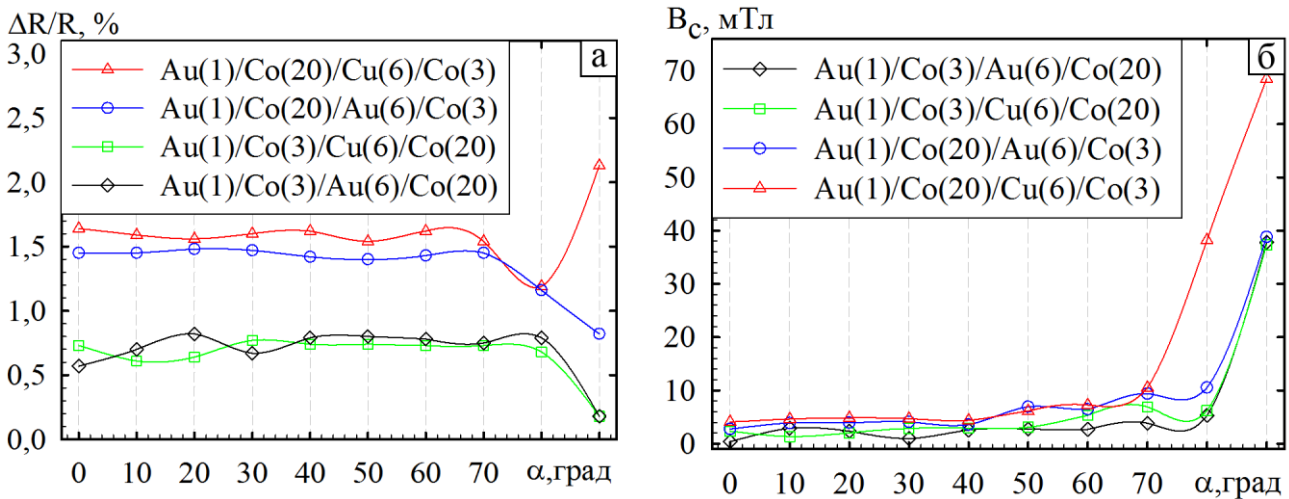


Рис. 6. Залежності зміни МО (а) та коерцитивної сили (б) від напрямку зовнішнього магнітного поля

У випадку коерцитивності (рис. 6 б), то вона також практично не залежить від кута α в інтервалі $\alpha=0-70^\circ$, що пов'язано з наявністю осі легкого намагнічування у цьому інтервалі значень кута α , що дозволяє намагнічувати та перемагнічувати спін-вентильні системи при малому полі. Різке зростання коерцитивної сили в інтервалі $\alpha=70-90^\circ$ в усіх чотирьох типах спін-вентилів можна пояснити анізотропією шару Co у площині підкладки. Для правильної інтерпретації отриманих результатів необхідно мати на увазі, що спін-вентилі №1 і №2 мають класичну структуру, в якій нижній, «закріплений» феромагнітний шар Co(20 нм) більш магнітожорсткий у порівняно з верхнім магніто-м'яким шаром Co(3 нм), який починає перемагнічуватися при меншому значенні індукції зовнішнього магнітного поля порівняно з шаром Co(20 нм).

Різка зміна МО саме і відбувається в інтервалі значень індукції, коли починають перемагнічуватися шари Co(3 нм) і Co(20 нм), що відбувається швидше за все в інтервалі $\alpha=70-90^\circ$. Перестановка цих шарів місцями у спін-вентильях №1 і №3 не призводить до зміни характеру залежності МО і B_c від кута α за винятком спін-вентиля №4. Особливість його структури полягає в тому, що шар Co(3 нм) межує із шаром Cu(6 нм), утворюючи твердий розчин (Cu, Co) із необмеженою розчинністю і елементами гранульованого стану ще на етапі конденсації багатошарової плівкової системи. Особливість перемагнічування шару т.р. і призводить до «аномальної» залежності МО від α . При заміні

шару Cu(6 нм) на Au(6 нм) також стабілізується твердий розчин (Au, Co), але з обмеженою розчинністю, що значною мірою не впливає на процес перемагнічування шару Co(3 нм). У випадку закріпленого шару Co(20 нм), він розчиняється лише частково, зберігаючи до певної міри свою індивідуальність, і не призводить до значного впливу на зміну МО спін-вентильних систем.

Нами також було проаналізовано питання про вплив відпалювання на магніторезистивні властивості. За експериментальними результатами були побудовані узагальнені кутові залежності МО (рис. 7). Із них видно, що відпалювання до температур 450-750 К не призводить до істотних змін величини МО, але при нагріванні до 900 К має місце суттєва зміна МО у системах Au(1)/Co(20)/Au(6)/Co(3)/SiO₂/Si (близько 0,8%) та Au(1)/Co(20)/Cu(6)/Co(3)/SiO₂/Si (близько 1,2%). Для інших систем відпалювання до 900 К не впливає на величину МО.

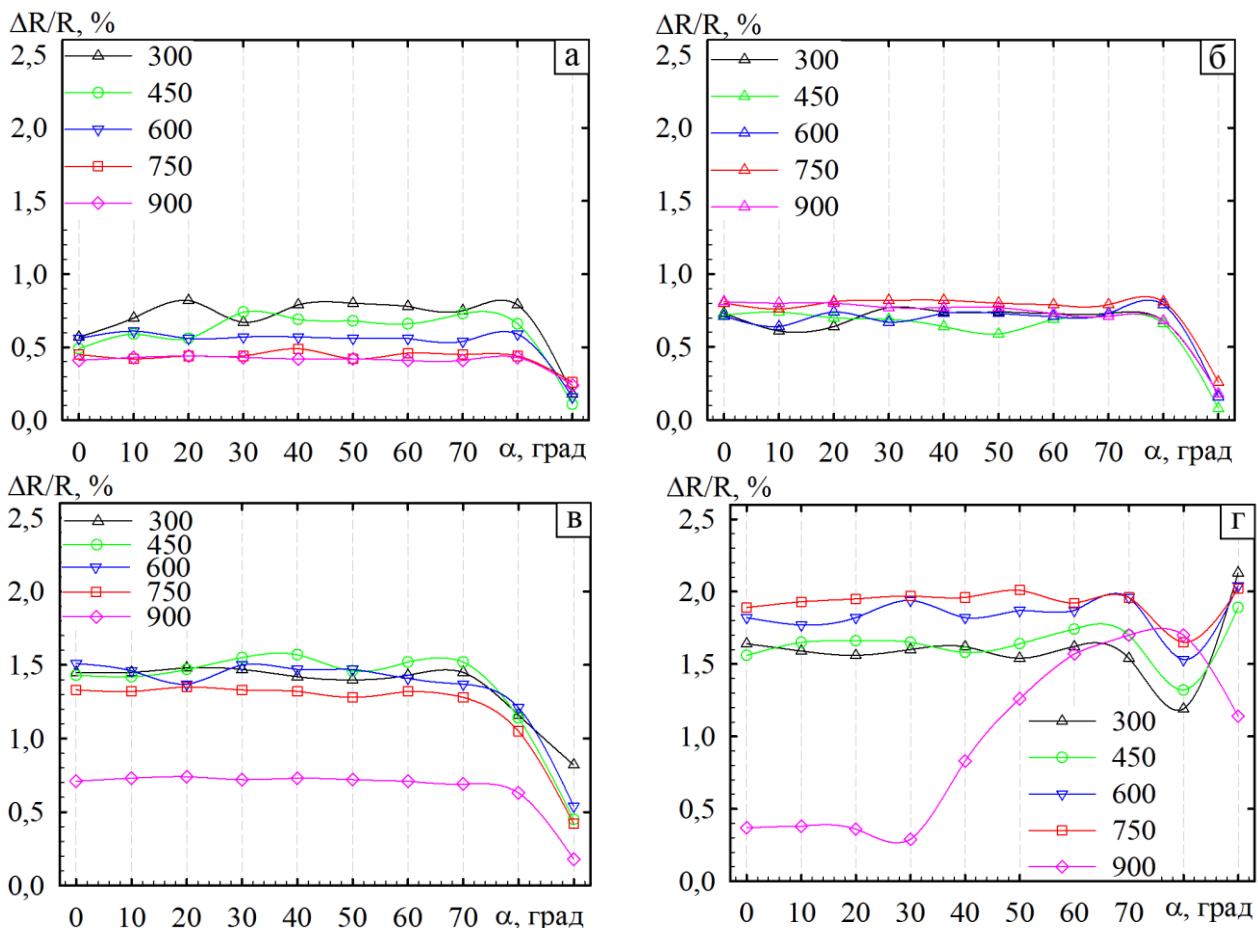


Рис. 7. Температурні залежності величини зміни магнітоопору від кута α для спін-вентильних систем: Au(1)/Co(3)/Au(6)/Co(20)/SiO₂/Si (а), Au(1)/Co(3)/Cu(6)/Co(20)/SiO₂/Si (б), Au(1)/Co(20)/Au(6)/Co(3)/SiO₂/Si (в), Au(1)/Co(20)/Cu(6)/Co(3)/SiO₂/Si (г)

У випадку спін-вентильної системи Au(1)/Co(20)/Cu(6)/Co(3)/SiO₂/Si відпалювання до температури 900 К призводить не лише до зміни величини

МО, а і форми гістерезисної кривої, що відбувається при наближенні до перпендикулярної геометрії дії магнітного поля (40-90°).

У другому підрозділі описано структурно-фазовий стан та магніторезистивні властивості наноструктурованих систем на основі НЧ оксидів Fe. З метою з'ясування магніторезистивних властивостей масивів НЧ та зіставлення зі спін-вентильними приладовими системами нами було розроблено методику отримання впорядкованих двовимірних ансамблів магнітних НЧ FeO і Fe₃O₄, дослідження їх структурно-фазового стану в широкому діапазоні температур, а також були вивчені магніторезистивні властивості у системах, що містять феромагнітні НЧ у парамагнітній чи антиферомагнітній матриці. З рис. 8 видно, що після нанесення НЧ на підкладці розміщуються рівномірно, формуючи моношар впорядкованого масиву. У ході проведення термообробки НЧ збільшуються, і спостерігається значне зростання середнього розміру. Узагальнені результати залежності середнього розміру НЧ FeO та Fe₃O₄ від температури відпалювання наведені на рис. 9. Як можна бачити, для обох кривих спостерігається характерна зміна при температурі між 750 та 900 К.

Результати дифракційних досліджень наведені у табл. 1 та 2, з яких видно, що НЧ мають ґратку типу шпінелі. Наведені на електроннограмах лінії відповідають кристалографічним площинам (111), (220), (311), (400), (422) та (511). В обох типах НЧ відразу після їх препарування на підкладці до відпалювання спостерігається значне зменшення міжплощинних відстаней та параметра ґратки порівняно з табличними значеннями для масивних зразків, що свідчить про стиснення кристалічної ґратки у НЧ. У випадку НЧ Fe₃O₄ при подальшому відпалюванні з'являються лінії з d_{hkl} , близькі до табличних значень магнетиту, та лінії, характерні для ОЦК фази α -Fe. У випадку невідпалених НЧ FeO лінії нечіткі і розмиті, що свідчить про дисперсність кристалітів наночастинок та наявність домішок іншої фази Fe₃O₄.

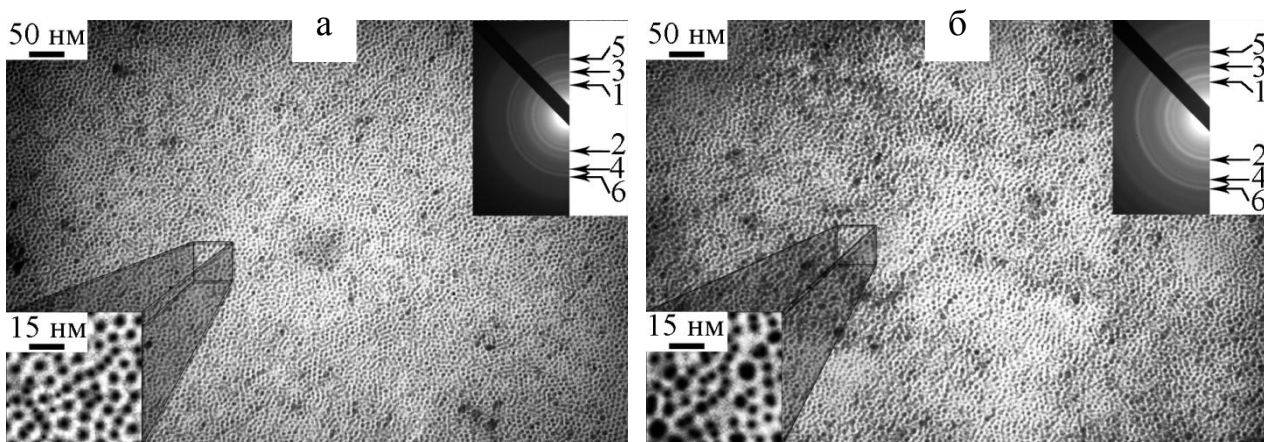


Рис. 8. Мікроструктура, електроннограма впорядкованих масивів НЧ FeO та Fe₃O₄. Стрілками на електроннограмах показані номери ліній в табл. 1 та 2

Таблиця 1

Результати розшифрування електроннограм від НЧ FeO до та після відпалювання

T, K	300			750			900			1200		
№ лін.	d_{hkl} , нм	hkl	фаза	d_{hkl} , нм	hkl	фаза	d_{hkl} , нм	hkl	фаза	d_{hkl} , нм	hkl	фаза
1	0,279	220	FeO	0,282	220	FeO/Fe ₃ O ₄	0,291	220	γ -Fe ₂ O ₃	0,202	110	α -Fe
2	0,237	311	FeO	0,240	311	FeO/Fe ₃ O ₄	0,246	311	γ -Fe ₂ O ₃	0,183	024	α -Fe ₂ O ₃
3	0,196	400	FeO	0,199	400	FeO/Fe ₃ O ₄	0,204	400	γ -Fe ₂ O ₃	0,145	300	α -Fe ₂ O ₃
4	0,16	422	FeO	0,163	422	FeO/Fe ₃ O ₄	0,172	422	γ -Fe ₂ O ₃	0,144	200	α -Fe
5	0,151	333	FeO	0,153	333	FeO/Fe ₃ O ₄	0,159	333	γ -Fe ₂ O ₃	0,129	119	α -Fe ₂ O ₃
6	0,149	440	FeO	0,141	440	FeO/Fe ₃ O ₄	0,147	440	γ -Fe ₂ O ₃	0,101	220	α -Fe
	a=0,795 нм			a=0,797 нм			a=0,825 нм			a=0,500 нм c=1,365 нм a=0,287 нм		
a ₀ =0,428 нм; a ₀ (α -Fe ₂ O ₃)=0,504 нм; c ₀ (α -Fe ₂ O ₃)=1,375 нм; a ₀ (Fe ₃ O ₄)=0,840 нм; a ₀ (γ -Fe ₂ O ₃)=0,840 нм; a ₀ (α -Fe)=0,286 нм												

Таблиця 2

Результати розшифрування електроннограм від НЧ Fe₃O₄ до та після відпалювання

T, K	300			750			900			1200		
№ лін.	d_{hkl} , нм	hkl	фаза	d_{hkl} , нм	hkl	фаза	d_{hkl} , нм	hkl	фаза	d_{hkl} , нм	hkl	фаза
1	0,288	220	Fe ₃ O ₄	0,289	220	Fe ₃ O ₄	0,478	111	Fe ₃ O ₄	0,298	220	γ -Fe ₂ O ₃
2	0,245	311	Fe ₃ O ₄	0,246	311	Fe ₃ O ₄	0,292	220	Fe ₃ O ₄	0,254	311	γ -Fe ₂ O ₃
3	0,202	400	Fe ₃ O ₄	0,203	400	Fe ₃ O ₄	0,249	311	Fe ₃ O ₄	0,210	400	γ -Fe ₂ O ₃
4	0,166	422	Fe ₃ O ₄	0,166	422	Fe ₃ O ₄	0,207	400	Fe ₃ O ₄	0,202	110	α -Fe
5	0,157	333	Fe ₃ O ₄	0,157	333	Fe ₃ O ₄	0,172	422	Fe ₃ O ₄	0,172	422	γ -Fe ₂ O ₃
6	0,143	440	Fe ₃ O ₄	0,143	440	Fe ₃ O ₄	0,161	333	Fe ₃ O ₄	0,162	333	γ -Fe ₂ O ₃
7							0,148	440	Fe ₃ O ₄	0,147	440	γ -Fe ₂ O ₃
8										0,144	200	α -Fe
	a=0,811 нм			a=0,815 нм			a=0,830 нм			a=0,840 нм a(α -Fe)=0,287 нм		
a ₀ (Fe ₃ O ₄)=0,840 нм; a ₀ (γ -Fe ₂ O ₃)=0,840 нм; a ₀ (α -Fe)=0,286 нм												

Після відпалювання до 750 К спостерігаються лінії магнетиту, після відпалювання до температури 900 К відбувається окиснення до фази $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, а після 1200 К фіксуються лінії від $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ та $\alpha\text{-Fe}$ (рис. 9).

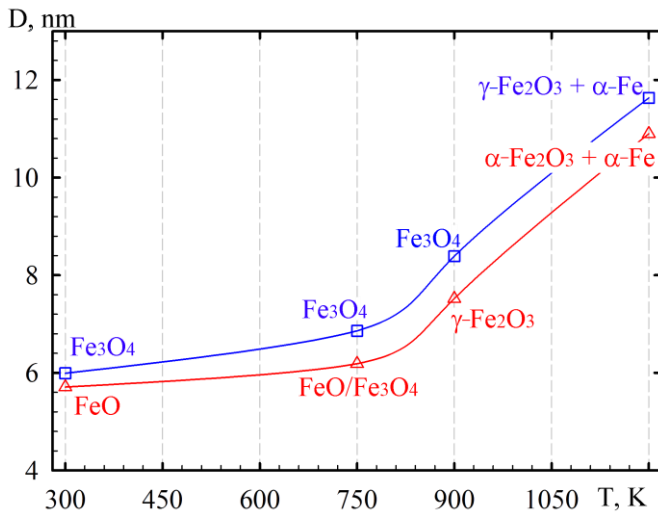


Рис. 9. Залежність середнього розміру НЧ оксидів заліза від температури відпалювання

основі отриманих експериментальних даних були побудовані кутові залежності магнітоопору (а) і коерцитивної сили (б), наведені на рис. 10 та 11. Як можна бачити, коерцитивна сила для обох систем збільшується із зростанням температури відпалювання, що зумовлено розмірним ефектом. Із підвищенням температури відпалювання НЧ збільшуються, а їх число зменшується. Ці зміни відбуваються в області розмірів, коли частинки залишаються однодоменними і переважно знаходяться в суперпарамагнітному стані, і лише невелика їх кількість знаходиться у феромагнітному стані.

Концентрація феромагнітних НЧ збільшується при збільшенні температури відпалювання. При цьому відстані між ними зменшуються і вони взаємодіють між собою через свої магнітні поля розсіювання. У нашому випадку частинки однодоменні, а це означає, що магнітний потік замикається поза ними. Протяжність таких полів розсіювання становить величину порядку розміру доменів. Якщо перемагнічування має когерентний характер, то магнітні моменти частинок повертаються паралельно один одному. Цей процес потребує більшої величини індукції магнітного поля, ніж у випадку окремої частинки, тобто у цьому випадку коерцитивна сила збільшується. Зміна коерцитивної сили НЧ при відпалюванні не пов'язана з їх розмірною залежністю. Вона збільшується зі зменшенням числа доменів, але в наших дослідженнях ми припускаємо, що феромагнітні частинки завжди залишалися однодоменними, оскільки виходячи з електронно-мікроскопічних досліджень можна зробити висновок про те, що коерцитивність не пов'язана із кристалграфічною анізотропією, анізотропією форми частинок, утворенням

У ході дослідження магніто-резистивних властивостей систем Au(2)/ Cu(20)/ FeO(НЧ)/ SiO₂/ Si та Au(2)/ Cu(20)/ Fe₃O₄(НЧ)/ SiO₂/ Si були отримані залежності зміни магнітоопору до і після відпалювання при температурах 450, 600, 750 та 900 К для декількох фіксованих напрямків дії магнітного поля стосовно зразка: по усій довжині проходження струму та перпендикулярного до площини зразка $\alpha=0$ та 90° відповідно. На

ланцюжків частинок чи внаслідок декорування феромагнітними частинками атомних сходинок відколу монокристалічної підкладки.

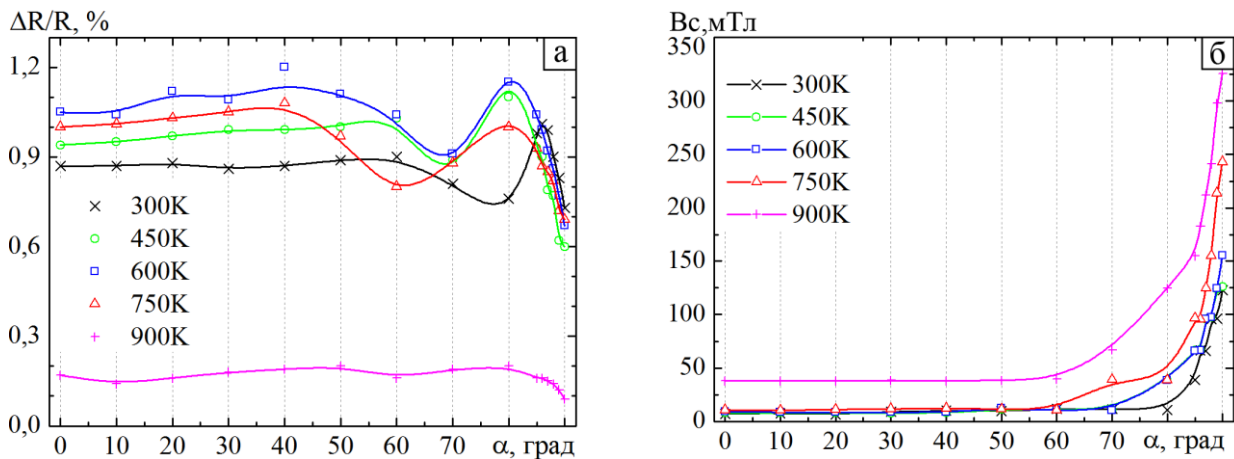


Рис. 10. Кутові залежності зміни МО (а) та поля коерцитивності (б) при відпалюванні для системи $Au(2)/Cu(20)/FeO(HЧ)/SiO_2/Si$

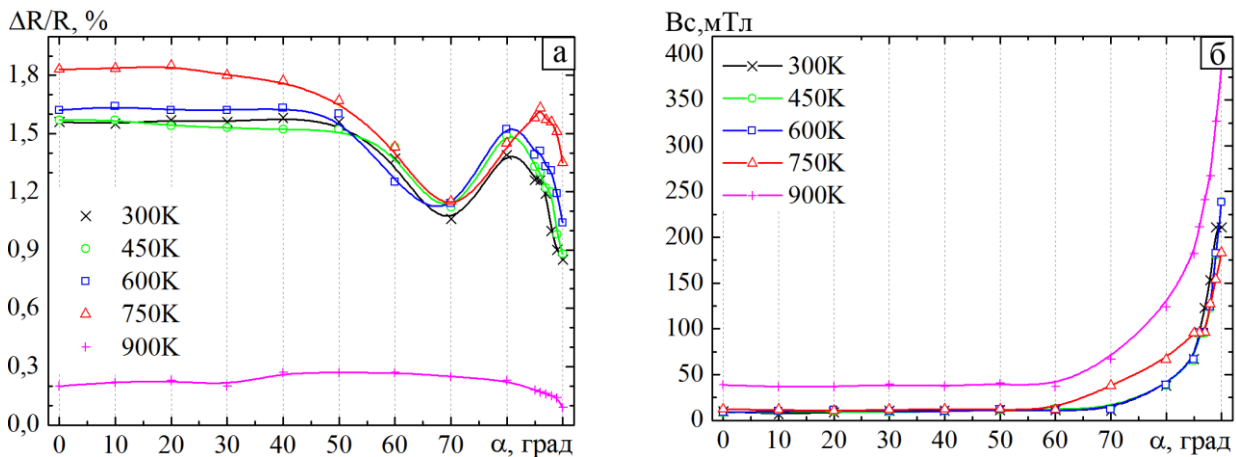


Рис. 11. Кутові залежності зміни МО (а) та поля коерцитивності (б) при відпалюванні для системи $Au(2)/Cu(20)/Fe_3O_4(HЧ)/SiO_2/Si$

Коерцитивна сила для обох систем найбільш різко змінюється в діапазоні кутів $60^\circ < \alpha < 90^\circ$ (набуває найбільшого значення при $\alpha = 90^\circ$). МО характеризується немонотонною кутовою залежністю (рис. 10 та 11).

Кутові залежності коерцитивної сили і магнітоопору пов'язані з наявністю осей легкого намагнічування. Ми припускаємо, що використання монокристалічної підкладки та проведення відпалювання зумовлюють переважну орієнтацію феромагнітних частинок у парамагнітній матриці.

Напрямок осі легкого намагнічування α визначається «провалом» (локальним мінімумом) на куткових залежностях магнітоопору. Для системи $Au(2)/Cu(20)/FeO(HЧ)/SiO_2/Si$ без відпалювання $\alpha = 80^\circ$, відпалювання при $T = 450$ і 600 К призводить до зміщення осі легкого намагнічування до 70° , і подальша термообробка при 750 і 900 К спричиняє до зміщення осі до 60° (рис. 10 а). Цей зсув добре корелює із фазовими переходами у ході

відпалювання зразка: $\text{FeO} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3 + \alpha\text{-Fe}$ (табл. 1, рис. 9).

Для невідпаленої системи $\text{Au}(2 \text{ нм})/\text{Cu}(20 \text{ нм})/\text{Fe}_3\text{O}_4(\text{НЧ})/\text{SiO}_2/\text{Si}$ (рис. 11 а) та при її відпалюванні до 450, 600 і 750 К «провал» (локальний мінімум) на кутових залежностях магнітоопору спостерігається при одному і тому самому значенні $\alpha^* = 70^\circ$.

Відпалювання при температурі 900 К обох систем на основі НЧ призводить до суттєвого зменшення магнітоопору. Через його невелике значення (незначне перевищення над шумом) не можна однозначно виділити характерні області на кутових залежностях МО.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язана задача стосовно встановлення особливостей магніторезистивних та оптичних властивостей спін-вентильних приладових систем на основі плівок Co, Fe, Cr, Cu(Au) та структурних особливостей формування наноструктурованих елементів спін-вентильних систем на основі наночастинок оксидів Fe і впливу дифузійних процесів та твердофазних реакцій на їх робочі характеристики (магнітоопір та коерцитивність). У роботі отримані такі наукові і практичні результати.

1. Методами нуль-еліпсометрії та МОКЕ вивчено вплив дифузійних процесів та фазоутворення на оптичні та магнітооптичні властивості спін-вентильних приладових систем на основі плівок Co, Fe, Cr та Cu:

- проаналізовано вплив зміни товщини немагнітного прошарку Cu та термообробки на оптичні властивості спін-вентильних систем та встановлено, що незначне збільшення товщини (із кроком 2 нм) проміжного шару багатошарової плівкової системи з урахуванням чутливості методу призводить до суттєвих змін кутів поляризації (Δ на $1,076^\circ$, а Ψ на $0,354^\circ$), що дає можливість з високою точністю оцінити оптичні параметри та товщину окремих шарів спін-вентильної системи;

- запропонована методика, що враховує дифузійні процеси та твердофазні реакції, які відбуваються у системі під час температурної обробки, для розрахунку оптичних параметрів та товщини як окремих, так і проміжних шарів багатошарової плівкової системи;

- встановлено, що у плівкових системах на основі Fe і Cr суттєва зміна оптичних параметрів і коерцитивності відбувається при температурах більше 600 К, що пояснюється формуванням твердого розчину (Fe, Cr) по усій товщині плівкової системи.

2. Уперше розраховані оптичні параметри та товщини окремих проміжних шарів гранульованих твердих розчинів (Cu, Co) спін-вентильних систем та показано, що до температури відпалювання 750 К не відбувається істотних змін оптичних характеристик систем, що свідчить про неінтенсивні дифузійні про-

цеси; термообробка при 900 К призводить до значних змін експериментальних даних, отриманих методом нуль-еліпсометрії, що пояснюється розмиттям інтерфейсів та формуванням гранульованого твердого розчину по усьому об'єму спін-вентилів.

3. Проаналізовано вплив матеріалу немагнітного прошарку та конфігурації магнітних шарів спін-вентильних систем на магніторезистивні властивості:

– встановлено, що у випадку немагнітного прошарку Cu MO збільшується лише при відносно великій товщині (20 нм) «незакріпленого» шару Co; в інших випадках матеріал немагнітного прошарку не вносить суттєвих змін у величину магнітоопору;

– при використанні «незакріпленого» шару Co більшої товщини (20 нм), ніж «закріпленого» (3 нм), спостерігається значний приріст величини MO на 0,68% при використанні немагнітного прошарку Au та на 1,36% у випадку Cu, але при цьому спостерігається аномальна залежність від напряму дії магнітного поля, що пояснюється утворенням твердого розчину з необмеженою розчинністю (Cu, Co) та з обмеженою розчинністю (Au, Co).

4. Методом просвічуючої електронної мікроскопії вивчено особливості формування впорядкованих масивів наночастинок та їх структурно-фазового стану. Визначено оптимальні умови формування впорядкованого моношару наночастинок з середнім розміром 6 нм. У ході термообробки проаналізовано фазові перетворення, що відбуваються у НЧ.

5. Досліджено вплив фазових перетворень в оксидах Fe, що відбуваються у системі металева плівка/НЧ/підкладка, на магнітоопір наноструктурованих систем на основі НЧ оксидів Fe без відпалювання та після термообробки при різних температурах залежно від геометрії вимірювання. У результаті проходження твердофазних реакцій спостерігається поступова зміна величини MO (до 30% при НЧ FeO та до 20% при НЧ Fe₃O₄). Після термообробки при 900 К спостерігається суттєве зменшення MO для обох типів НЧ, що може бути пов'язано з утворенням 3-вимірної ансамблю НЧ у непровідній діелектричній матриці.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати

1. Null-ellipsometry investigations of the optical properties and diffusion processes in spin-valve structures based on Co and Cu / [M. Demydenko, S. Protsenko, P. Siffalovic] // Thin Solid Films.– 2012.– V.520.– P.5722.
2. Програмно-апаратний комплекс досліджень оптичних властивостей тонких плівок / [М.Г. Демиденко, С.І. Проценко, К.В. Тищенко, О.В. Федченко] // Ж. нано- електрон. фіз.–2012.–Т.4, №2.– С.02038.
3. Особливості магнітоопору і спін-вентильних системах на основі

- Au/Co/Cu/Co/Au/SiO₂ / [Демиденко М.Г., Проценко С.І., Шіффаловіч П.] // *Металлофіз. новейшие технол.* – 2011.– Т.33, №5.– С.623-630.
4. Демиденко М.Г. Магніторезистивні властивості спін-вентильних структур на основі Co та Cu або Au / [Демиденко М.Г., Проценко С.І., Костюк Д.М., Чешко І.В.] // *Ж. нано-електрон. фіз.* – 2011.– Т.3, №4.– С.106-113.
 5. Демиденко М.Г. Використання генетичного алгоритму для розв'язання оберненої задачі еліпсометрії / [М.Г. Демиденко, С.І. Проценко, О.Б. Проценко, О.Ф. Федченко, П. Шіффаловіч] // *Вісник СумДУ. Серія Фізика, математика, механіка.* – 2008.– №1.– С. 33-42.
 6. Magnetic and magneto-resistance properties of spin-valves based on Co and Cu or Au film systems: Proceedings of the [1-st International conference “NAP-2011”], (Alushta, 27-30 September 2011) / [Demydenko M.H., Kostyuk D.M., Protsenko S.I.] – Alushta: Sumy State University, 2011.– V.2, №1.– P. 238-241.
 7. Nepijko S.A. Magnetoresistance properties of Fe₃O₄ nanoparticles in a Cu matrix / Nepijko S.A., Kutnyakhov D., Demydenko M., Protsenko S., Kostyuk D., Schoenhense G. // *Abstracts of the International conference “Verhandlugen Ф”.* – Berlin, 2012.– P. MA 20.13.
 8. Демиденко М.Г. Формування впорядкованих масивів наночастинок FeO як чутливих елементів спін-вентилів / Демиденко М.Г., Проценко С.І. // *Тези доповідей Міжнародної конференції молодих учених і аспірантів «ІЕФ-2011».* – Ужгород: Інститут електронної фізики НАН України, 2011.– С.100
 9. Исследование оптических, магнитооптических свойств и структурно-фазового состояния пленочных систем на основе Cr и Fe: Proceedings of the [20-th International Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology”], (Sevastopol, 13-17 September 2010) / [Демиденко М.Г., Проценко С.І.] – Sevastopol: SevNTU, 2010.– P. 886-887.
 10. Разработка автоматизированного комплекса для исследования магнито-резистивных свойств наноструктурированных пленочных систем: сборник трудов [«Девятой международной научно-практической конференции «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments»], (Москва, Россия, 3-4 декабря 2010) / [Демиденко М.Г., Проценко С.І.] – Москва: Российский университет дружбы народов, 2010.– С. 390-392.
 11. Демиденко М.Г. Проведення точних електричних вимірювань у спін-вентильних структурах у магнітному полі: Матеріали 9-ї Міжнародної конференції «Фізичні явища в твердих тілах» / Демиденко М.Г., Проценко С.І., Сафарич Р. – Харків: ХНУ ім. В.Н. Каразіна, 2009.– С.74.
 12. Protsenko S.I. Magneto-optical and magnetoresistive properties of spin-valve structures based on films Co and Au or Cu / Protsenko S.I., Cheshko I.V., Demydenko M.H., Shumakova N.I. // *Book of abstracts of the International Conference for Young Scientists “Low Temperature Physics”.* – Kharkiv:

- B. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering, 2010.– P. 80
13. Development of web-oriented cluster application for experimental data processing, received by ellipsometry method and X-ray reflectometry: proceedings of the International Conference [“ICL-2009”], (Villach, Austria, 23-25 September 2009) / [Protsenko S., **Demydenko M.**, Fedchenko O., Safaric R.].–Villach: Karintian Fachoschoole, 2009.– P.1(2)-2(2).
14. Разработка программного обеспечения для проведения точных измерений магнитосопротивления в спин-вентильных структурах: сборник трудов [«Восьмой международной научно-практической конференции «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments»], (Москва, Россия, 20-21 ноября 2009) / [Демиденко М.Г., Проценко С.И.].– Москва: Российский университет дружбы народов, 2009.– С. 294-296.

2. Наукові праці апробаційного характеру

15. The investigation of magnetoresistive properties in spin-valve structures based on Co and Cu or Au in FIP and FPP geometries: Proceedings of the [7-th International Conference “NEET-2011”], (Zakopane, Poland 28 June – 1 July 2011) / [**Demydenko M.**, Protsenko S., Kostyuk D.]. – Zakopane: Lublin University of Technology, 2011.– P. 193.
16. Программно-аппаратный комплекс для исследования магниторезистивных свойств в сменной геометрии поля: Сборник трудов [«Десятой международной научно-практической конференции «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments 2011»], (Москва, Россия, 8-9 декабря 2011) / [Костюк Д.Н., **Демиденко М.Г.**, Проценко С.И.].– Москва: Российский университет дружбы народов, 2011.– С. 498-500.
17. Демиденко М.Г. Дослідження магніторезистивних властивостей спин-вентильних структур з СІР геометрією протікання струму / **Демиденко М.Г.**, Проценко С.І. // Тези доповідей «Міжнародної конференції студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики «Еврика-2011».– Львів: ЛНУ ім. І. Франка, 2011.– С. С10.
18. Demydenko M. Optical properties of nanostructured films systems based on Ag/Co / **Demydenko M.**, Protsenko S., Siffalovich P., Safaric R. // Abstracts of the 8-th International conference “Electronic Processes in Organic and Inorganic Materials”.– Synyogora: Vasyl Stefanyk Precarpathian National University MES of Ukraine, 2010.– P. 122-123.

3. Праці, які додатково відображають наукові результати

19. Демиденко М.Г. Дослідження процесу фазоутворення у спін-вентильних структурах методом нуль-еліпсометрії / Демиденко М.Г., Проценко С.І. // Матеріали II наукового семінару «Сучасні проблеми наноелектроніки». – Суми: СумДУ, 2011. – С.43-47.
20. Демиденко М.Г. Формування впорядкованих масивів магнітних наночастинок Fe_3O_4 , FeO , $FeNi$ та $FeCr$ як чутливих елементів спін-вентилів / Демиденко М.Г., Проценко С.І., Шафарич Р. // Тези доповідей «Міжнародної конференції студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики «Еврика-2010». – Львів:ЛНУ ім. І. Франка, 2010. – С. А12.
21. Сучасні технології отримання наноструктурованих поверхонь: micro/nanopatterning, nanoparticles, nanosphere lithography: матеріали [Науково-практичної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів фізико-технічного факультету], (Суми, 21-24 квітня 2008) / [Іващенко М.М., Демиденко М.Г.]. – Суми: СумДУ, 2008. – С. 107.

АНОТАЦІЯ

Демиденко М.Г. Магніторезистивні та оптичні властивості спін-вентильних систем на основі Co, Fe, Cr і Cu та наночастинок оксидів Fe. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем. – Сумський державний університет, Суми, 2012.

Дисертацію присвячено комплексному дослідженню магніторезистивних і оптичних властивостей спін-вентильних та наноструктурованих приладових систем на основі плівок Co, Fe, Cr і Cu (Au) та наночастинок оксидів Fe. У роботі вивчено фазові перетворення та умови формування дво- та тривимірних ансамблів наночастинок, встановлено взаємозв'язок між особливостями структурно-фазового стану та магніторезистивними і оптичними властивостями спін-вентильних систем. Досліджені магніторезистивні властивості спін-вентильних та наноструктурованих приладових систем, встановлені механізми формування проміжних шарів твердого розчину між інтерфейсами компонент спін-вентильних систем та впливу процесу фазоутворення на величину магнітоопору. Експериментально вивчено розмірні, температурні та концентраційні ефекти у магнітоопорі, коерцитивності, магнітооптичному ефекті Керра та ступені поляризації спін-вентильних систем, а також вплив орієнтації магнітного поля на магніторезистивні властивості спін-вентильних та наноструктурованих систем. Встановлені залежності оптичних характеристик від матеріалу та товщини немагнітного прошарку у спін-вентильних системах.

Проаналізовано вплив дифузійних процесів та фазоутворення на оптичні властивості спін-вентильних приладових систем. У результаті досліджень були розроблені рекомендації щодо застосування наноструктурованих поверхонь на основі наночастинок оксиду Fe як магніточутливих шарів спін-вентильних систем.

Ключові слова: спін-вентильні системи, наночастинки, гігантський магнітний опір, гранульовані тверді розчини, еліпсометрія, магнітооптичний ефект Керра.

АННОТАЦИЯ

Демиденко М.Г. Магниторезистивные и оптические свойства спин-вентильных систем на основе Co, Fe, Cr и Cu и наночастиц оксидов Fe. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – физика приборов, элементов и систем. – Сумский государственный университет, Сумы, 2012.

Диссертация посвящена комплексному исследованию процессов фазообразования, магниторезистивным и оптическим свойствам спин-вентильных и наноструктурированных приборных систем на основе пленок Co, Fe, Cr, Cu (Au) и наночастиц оксидов Fe. В работе изучены фазовые превращения и условия формирования двух- и трехмерных ансамблей наночастиц, установлены взаимосвязи между особенностями структурно-фазового состояния, магниторезистивными и оптическими свойствами спин-вентильных систем на основе пленок Co, Fe, Cr, Cu (Au) и наночастиц оксидов Fe. Исследованы магниторезистивные свойства спин-вентильных и наноструктурированных приборных систем, установлены механизмы формирования промежуточных слоев твердого раствора между интерфейсами компонент спин-вентильных систем методом нуль-еллипсометрии и экспериментально показано влияние процессов фазообразования на величину магнитосопротивления. Экспериментально изучены размерные, температурные и концентрационные эффекты в магнитосопротивлении, коэрцитивности, магнітооптическом эффекте Керра и степени поляризации спин-вентильных систем. Установлены зависимости оптических характеристик от материала и толщины немагнитного слоя в спин-вентильных системах и проанализировано влияние прохождения диффузионных процессов и фазообразования на оптические свойства спин-вентильных приборных систем и влияние ориентации магнитного поля на магниторезистивные свойства спин-вентильных и наноструктурированных систем.

Для проведения экспериментальных исследований был усовершенствован и разработан ряд методик, в том числе разработана серия программно-аппаратных комплексов в виде удаленно-контролируемой лаборатории для

исследования магниторезистивных и оптических свойств спин-вентильных и наноструктурированных систем. Для анализа экспериментальных данных, полученных методом нуль-эллипсометрии, был использован генетический алгоритм для поиска решений обратной задачи эллипсометрии, что позволило значительно повысить продуктивность программного решения и сократить время расчета.

В результате исследований были разработаны рекомендации по применению наноструктурированных поверхностей на основе наночастиц оксида Fe в качестве магниточувствительных слоев спин-вентильных систем.

Ключевые слова: спин-вентильные системы, наночастицы, гигантское магнитное сопротивление, гранулированные твердые растворы, эллипсометрия, магнитооптический эффект Керра.

ABSTRACT

Demydenko, M.H. Magnetoresistive and optical properties of spin-valve systems based on Co, Fe, Cr and Cu and nanoparticles of Fe oxides. – 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, 2012.

The thesis is devoted to the investigation of optical and magnetoresistive properties of spin-valve and nanostructured instrumentation systems based on thin films of Co, Fe, Cr and Cu (Au) and nanoparticles of iron oxide. In this work we studied the phase transformations and the conditions of formation of two- and three-dimensional ensembles of nanoparticles, the dependencies between structural features of the phase state and optical and magnetoresistive properties of spin-valve systems. The magnetoresistive properties of spin-valve and nanostructured instrument systems were investigated. The mechanisms of formation of intermediate layers of solid solution between the interface component of spin-valve systems and influence the process of formation on the value of magnetoresistance were established. The effects of dimension size, temperature and concentration on the magnetoresistance, coersivity magneto-optical Kerr effect and degree of polarization and influence of the orientation of the magnetic field to the magnetoresistive properties of spin-valve and nanostructured systems were experimentally studied. The dependence of optical properties of the material and thickness of the nonmagnetic layer in spin-valve systems were established. The influence of diffusion processes and phase formation on the optical properties of spin-valve instrument systems was analyzed. As a result, recommendations for the usage of nanostructured surfaces based on nanoparticles of iron oxide as magneto sensitive layers in spin-valve systems were developed.

Key words: spin-valve systems, nanoparticles, giant magnetoresistance, granulated solid solutions, ellipsometry, magneto-optical Kerr effect.

Підписано до друку 07.08.2012.
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.