

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Воробйов Сергій Ігорович



УДК 538.975: [537.621.2+537.622+681.586.7]

**ВПЛИВ ПРОЦЕСІВ ФАЗОУТВОРЕННЯ НА МАГНІТНІ
І МАГНІТОРЕЗИСТИВНІ ВЛАСТИВОСТІ ПРИЛАДОВИХ
СТРУКТУР НА ОСНОВІ Fe (Co) ТА Gd**

01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Суми – 2015

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник – доктор фізико-математичних наук, професор
Чорноус Анатолій Миколайович,
Сумський державний університет,
проректор з наукової роботи.

Офіційні опоненти: член-кореспондент НАПН України,
доктор фізико-математичних наук, професор
Горобець Юрій Іванович,
Інститут магнетизму НАН України,
заступник директора з наукової роботи;

кандидат фізико-математичних наук, доцент,
старший науковий співробітник,
Сухов Володимир Миколайович,
Харківський національний університет
імені В. Н. Каразіна,
доцент кафедри експериментальної фізики

Захист відбудеться «29» травня 2015 р. о 12⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 55.051.02 Сумського державного університету за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, корпус БЩ, ауд. 307.

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

Автореферат розіслано «28» квітня 2015 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



І. В. Чешко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У теперішній час розвиток електроніки і сенсорного приладобудування характеризується розробкою нових багатофункціональних матеріалів у вигляді багатошарових плівок, мультишарів і сплавів із високими показниками їх магнітних властивостей та стабільністю робочих параметрів.

Плівкові системи на основі феромагнітних (Т) і рідкоземельних (R) металів із різною товщиною шарів становлять інтерес із точки зору їх можливого практичного використання при створенні носіїв інформації із високою щільністю магнітного запису, елементів спінової електроніки та магнітооптичних систем. Аморфні плівкові сплави і багатошарові плівки на основі R- і T-металів, що характеризуються 3d-4f електронною обмінною взаємодією, мають ряд унікальних властивостей і вважаються новим класом магнітовпорядкованих речовин. Це пов'язано з особливостями взаємного антиферомагнітного впорядкування у R/T-системах. Воно може реалізуватися при стабілізації аморфного (квазіаморфного) стану у шарах із R-металів, а при дотриманні певних умов формування і параметрів плівкових зразків можна синтезувати матеріали із необхідними наперед заданими електрофізичними і магнітними властивостями.

Створення функціональних елементів у вигляді мультишарів і багатошарових плівок, зокрема на основі R/T-металів, супроводжується рядом невирішених проблем, пов'язаних із відсутністю однозначної інформації щодо особливостей дифузійних процесів, фазоутворення і структурних перетворень в умовах дії різних фізичних полів, що призводять до зміни властивостей усієї системи в цілому. Вирішення цих проблем важливе із точки зору подальшого практичного використання таких систем, як функціональних елементів для сучасних мікроелектронних приладів і сенсорів.

Таким чином, встановлення взаємозв'язку між структурно-фазовим станом, магнітними і магніторезистивними властивостями плівкових систем на основі R/T-металів є актуальним завданням, що й визначило мету цієї роботи.

Зв'язок роботи із науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконана на кафедрі прикладної фізики Сумського державного університету у рамках держбюджетних тематик: «Фазовий склад, електро- і магніторезистивні властивості плівкових матеріалів із спін-залежним розсіюванням електронів», № 0109U001387 (2009 – 2011 pp.); «Вплив структурно-фазового стану на магнітні, магніторезистивні та електорофізичні властивості плівкових систем на основі Fe(Co)/Gd та Fe(Ni,Co)/Ag(Cu)», № 0112U004688 (2012 – 2014 pp.); «Фізичні засади плазмових технологій для комплексної обробки багатокомпонентних матеріалів та покриттів», № 0113U000137с (2013 – 2015 pp.); державної програми МОН України «Навчання студентів і аспірантів та стажування

наукових і науково-педагогічних працівників у провідних вищих навчальних закладах та наукових установах за кордоном» згідно з договором між Сумським державним університетом і Університетом Лотарингії (м. Нансі, Франція) у рамках індивідуального плану у 2011 – 2012 і 2013 роках. Дисертант брав участь у дослідженнях із зазначених НДР як виконавець та під час підготовки звітів.

Мета і задачі досліджень. Мета дисертаційної роботи полягала у встановленні загальних закономірностей у магнітних і магніторезистивних властивостях приладових структур на основі плівкових нанорозмірних систем із перехідних феромагнітних (Fe, Co) і рідкоземельного (Gd) металів та з'ясування впливу на них процесів фазоутворення й орієнтації зразків у зовнішньому магнітному полі.

Відповідно до поставленої мети роботи необхідно було вирішити такі задачі:

- установити вплив умов осадження, термообробки і товщини шарів на структурно-фазовий стан одношарових плівок Fe, Co і Gd та плівкових систем на основі Fe (Co) і Gd;
- дослідити магнітні й магніторезистивні властивості одношарових плівок і систем до і після термообробки;
- вивчити вплив кількості повторювань, товщини фрагментів мультишарів і окремих шарів плівкових систем та умов термообробки на магнітні й магніторезистивні властивості;
- установити взаємозв'язок між особливостями структурно-фазового стану приладових структур у вигляді тришарових плівок і мультишарів та їх магнітними і магніторезистивними властивостями;
- вивчити електрофізичні властивості одношарових плівок Т-металів із покриттям із Gd для встановлення їх впливу на параметри поверхневого і зерномежового розсіювання електронів;
- дослідити вплив орієнтації зразків у зовнішньому магнітному полі на величину магнітоопору, коерцитивної сили та намагніченості плівкових систем;
- провести розрахунок величини чутливості до магнітного поля і прямокутності петель гістерезису плівкових систем;
- обговорити результати під кутом зору можливого практичного використання плівкових систем для створення функціональних елементів спінтроники та сенсорики.

Об'єкт дослідження – процеси фазоутворення та магнітні й магніторезистивні властивості функціональних матеріалів приладових структур у вигляді плівкових систем.

Предмет дослідження – вплив фазового складу на магніторезистивні властивості (магнітоопір (MO), чутливість до магнітного поля (S_B)) та магнітні характеристики (коерцитивну силу (B_c), залишкову намагніченість

(M_r), намагніченість насичення (M_s) і коефіцієнт прямокутності петлі гістерезису (KPI) тришарових плівок та мультишарів на основі Fe (Co) і Gd.

Методи дослідження – вакуумна пошарова конденсація металів електронно-променевим та магнетронним методами, просвічуюча електронна мікроскопія та електронографія, рентгенівська дифракція та рефлектометрія, атомно- і магнітосилова мікроскопія, методи резистометрії під час відпалювання зразків у вакуумі та вимірювання магніторезистивних властивостей при паралельній, перпендикулярній і поперечній геометріях, вібраційна і надпровідна квантова (SQUID) магнітометрія.

Наукова новизна одержаних результатів. Проведені у роботі комплексні експериментальні дослідження фізичних процесів у приладових структурах на основі Fe (Co) і Gd дозволили отримати такі нові результати:

1. Знайшло подальшого розвитку вивчення процесів фазоутворення у плівкових приладових структурах на основі Fe (Co) і Gd. Показано, що у шарах із Gd залежно від товщини та умов термообробки ($T_g = 700 - 900$ K) утворюються такі фази: квазіаморфний-Gd, ГЦП-Gd, ГЦП-Gd + ГЦК-GdH₂, ГЦП-Gd + ГЦК-GdH₂ + ОЦК-Gd₂O₃.

2. Уперше встановлено вплив ефективної товщини (до 10 нм) прошарку із квазіаморфного Gd на залежність магнітоопору і коерцитивної сили тришарових плівок Fe/Gd/Fe і Co/Gd/Co та показано, що ці розмірні залежності мають осцилюючий характер.

3. Уперше встановлено взаємозв'язок магнітних та магніторезистивних властивостей матеріалів функціональних елементів на основі Fe (Co) і Gd із їх структурно-фазовим складом залежно від товщини окремих шарів і фрагментів та кількості повторювань. При цьому показано:

- при переході прошарку Gd із квазіаморфного стану у кристалічний зникає осциляційний характер розмірних залежностей МО і коерцитивної сили;
- наявність прошарку із кристалічного Gd приводить до пошарового перемагнічування та збільшення коерцитивності тришарових плівок;
- при збільшенні кількості фрагментів мультишари [Co/Gd] від 2 до 8 величини коерцитивної сили та залишкової намагніченості й намагніченості насичення зростають за рахунок розмиття інтерфейсів та збільшення концентрації феромагнітної компоненти відповідно;
- у процесі відпалювання ($T_g = 700 - 800$ K) на інтерфейсах утворюється аморфний твердий розчин (Co, Gd) із ферімагнітним упорядкуванням, що приводить до зникнення антиферомагнітної взаємодії між шарами та зростання коерцитивності систем.

4. Уперше показано, що мультишари на основі Co і Gd характеризуються високими показниками коефіцієнтів прямокутності петель гістерезису і чутливості до магнітного поля та є стабільними в широкому діапазоні температур (300 – 800 K), що дозволяє розглядати їх як перспективні

матеріали при виготовленні функціональних елементів для сучасного приладобудування.

5. Уперше досліджено вплив орієнтації мультишарів на основі Co та Gd у зовнішньому магнітному полі у площині плівки після термообробки ($T_0 = 700$ K). Встановлено, що у плівках зберігається одновісна магнітна анізотропія, що свідчить про високу термічну стабільність властивостей і дозволяє розглядати такі системи як матеріал для чутливих елементів датчиків положення.

Практичне значення одержаних результатів. Результати комплексних експериментальних досліджень, отриманих у роботі, поглиблюють розуміння фундаментальних питань щодо взаємозв'язку структурно-фазового стану, магнітних і магніторезистивних властивостей плівкових систем після термообробки на стабільність робочих характеристик матеріалів для чутливих елементів датчиків магнітного поля та середовища для термомагнітного запису інформації. Вони можуть бути використані під час формування функціональних елементів із наперед заданими робочими характеристиками, які будуть відрізнятися високими показниками коефіцієнтів прямокутності петель гістерезису і чутливості до магнітного поля та є стабільними в широкому діапазоні робочих температур.

Дослідження впливу орієнтації зразків у зовнішньому магнітному полі на магнітні та магніторезистивні характеристики плівкових систем дозволило визначити області детектування кутів положення і повороту відносно магнітного поля чутливими елементами на їх основі. Залежності чутливості до магнітного поля тришарових плівок і мультишарів як функціональних елементів датчиків у різних геометріях вимірювання дають можливість установити швидкість реагування датчика на зміну сигналу, що надходить і точність вимірювання при детектуванні слабких магнітних полів.

Особистий внесок здобувача полягає у самостійному пошуку й аналізі літературних джерел, проведенні експериментальних досліджень. Автор особисто отримував плівкові зразки, проводив дослідження їх структурно-фазового стану, магнітних і магніторезистивних властивостей, обробку та інтерпретацію цих результатів.

Постановку задач досліджень та узагальнення експериментальних результатів проведено спільно з науковим керівником д.ф.-м.н., проф. Черноусом А. М.. В обговоренні результатів роботи брали участь д.ф.-м.н., проф. Проценко І. Ю. (щодо структурно-фазового стану) і співробітники Університету Лотарингії (м. Нансі, Франція) д.-ф. Т. Хаует і проф. М. Хехн (щодо магнітних властивостей).

Особисто автором підготовлені тексти статей [3, 7], тези доповідей [8 – 14] та окремі розділи статей [1, 2, 4 – 6]. Основні наукові результати доповідалися особисто автором на наукових семінарах та конференціях.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові й практичні

результати роботи оприлюднені та обговорені на таких конференціях: Conference of Electronic Engineering and Technology in the 12 th International Youth Forum «Electronics and Youth in the XXI century» (м. Харків, 2011 р.); International conference of students and young researchers in theoretical and experimental physics «HEUREKA» (м. Львів, 2012 – 2014 pp.); 3 th International Conference «Nanomaterials: Applications and Properties – 2013» (м. Алушта, 2013р.); «International Conference of the Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems, ICPTTFN-XIV» (м. Івано-Франківськ, 2013 р.); Міжнародній практичній конференції «Nanotechnology and Nanomaterials» (Львів – Буковель, 2013 р.); науково-технічних конференціях «Фізика, електроніка, електротехніка» (м. Суми, 2010 – 2014 pp.).

Публікації. Результати дисертації відображені у 15 публікаціях: 6 статтях у періодичних наукових журналах, зокрема 5 у журналах, які входять до переліку фахових видань і 4 у виданнях, що індексуються БД Scopus, та 1 статті і 8 тезах у матеріалах міжнародних і всеукраїнських конференцій.

Структура і зміст роботи. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків та списку використаних джерел. Вона викладена на 200 сторінках, із них 117 сторінок основного тексту, 103 рисунки і 17 таблиць, у тому числі 88 рисунків і 16 таблиць на 61 окремому аркуші. Список використаних джерел складається із 190 найменувань на 17 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета й основні задачі дослідження, висвітлено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, відмічений зв'язок роботи із науковими тематиками і програмами, наведена інформація про апробацію отриманих результатів, особистий внесок здобувача і структуру дисертаційної роботи.

У **першому розділі** «Фізичні процеси у функціональних елементах на основі плівкових систем із рідкоземельних та феромагнітних металів (літературний огляд)» наведений огляд літературних джерел щодо фазового складу, магнітних та магніторезистивних властивостей плівкових систем на основі феромагнітних і рідкоземельних металів. Зокрема, у *першому підрозділі* проведений аналіз літературних джерел щодо процесів фазоутворення і взаємної дифузії у плівкових системах на основі феромагнітних і рідкоземельних металів.

У *другому підрозділі* розглянуті дані про вивчення магнітних і магніторезистивних властивостей плівок на основі R/T-металів. Показано, що на величину МО і магнітних характеристик впливають співвідношення товщин шарів і концентрацій компонент, структурно-фазовий стан та орієнтація зразків відносно прикладеного зовнішнього магнітного поля тощо.

У *третьому підрозділі* розглянуті можливі напрямки використання плівкових систем на основі феромагнітних і рідкоземельних металів як функціональних елементів для сучасної приладової бази магнітоелектроніки.

У **другому розділі** «Методика і техніка експерименту» описані методи отримання зразків, умови їх термообробки, дослідження структурно-фазового стану, магнітних та магніторезистивних властивостей плівкових систем.

Плівкові зразки на основі Fe (Co) та Gd були отримані шляхом пошарової конденсації у робочому об'ємі вакуумної установки методами електронно-променевого випаровування й магнетронного осадження. Для контролю товщини плівок у процесі конденсації використовувався метод кварцового резонатора.

Термообробка одношарових, тришарових плівок та мультишарів здійснювалася за схемою «нагрівання → витримка протягом 15 хв при T_e → охолодження до кімнатної температури» в інтервалі $T_e = 300 - 1000$ К.

Дослідження структурно-фазового стану проводилося із використанням методів просвічуючої електронної мікроскопії і електронографії, рентгенівської дифракції і рефлектометрії й атомно- і магнітосилової мікроскопії.

Вивчення магнітних властивостей проводилося із використанням методів вібраційної і надпровідної квантової (SQUID) магнітометрії при різних кутах орієнтації зразків відносно прикладеного зовнішнього магнітного поля. Магніторезистивні властивості плівкових систем досліджувалися за допомогою методів високоточної резистометрії за чотириточковою схемою при трьох взаємних орієнтаціях магнітного поля до площини зразка і напрямку протікання струму. Розрахунок магнітоопору проводився за співвідношенням:

$$MO = \Delta R/R_S = (R_B - R_S)/R_S, \quad (1)$$

де R_B і R_S – опір плівки при заданому полі та полі насичення відповідно.

Третій розділ «Процеси фазоутворення в одношарових плівках та системах на основі Fe (Co) та Gd» складається з трьох підрозділів.

У *першому підрозділі* наведені результати досліджень фазового складу свіжосконденсованих і термовідпалених до $T_b = 700 - 900$ К одношарових плівок Co, Fe, та Gd. Показано, що при ефективній товщині шарів Fe ≤ 10 нм вони перебувають у дрібнодисперсному стані. При товщинах $d_{Fe} \geq 10$ плівки мають ОЦК-структуру із параметром кристалічної решітки $a = 0,286$ нм. Фазовий склад плівок Fe після термообробки до граничної температури T_o (значення якої є розмірно-залежною величиною та змінюється від 550 до 720 К в інтервалі товщин 15 – 150 нм) відповідає ОЦК-Fe з параметром решітки, який співпадає з даними для масивних зразків. Збільшення температури відпалювання викликає зародження у плівках Fe оксидної фази Fe₃O₄.

У свіжосконденсованому стані одношарові плівки Co мають фазовий стан ГЦП-Co із невеликим вмістом фази ГЦК-Co. Наявність цієї фази пояснюється дефектами пакування (ДП) у ГЦП-Co. Після термообробки при температурах 800 і 1000 К одношарові плівки мають фазовий склад ГЦП-Co + ГЦК-Co.

Свіжосконденсовані одношарові плівки Gd схильні до аморфізації. При ефективних товщинах шарів $d_{Gd} < 10$ нм електронграфічно спостерігається квазіаморфна фаза. При збільшенні товщини $d_{Gd} > 10$ нм проявляються процеси кристалізації.

Аналіз результатів електронграфічних досліджень (рис. 1) свідчить про те, що плівки гадолінію товщиною від 10 до 40 нм у свіжосконденсованому стані мають фазовий склад ГЦП-Gd + ГЦК-GdH₂ зі слідами ОЦК-Gd₂O₃, що наявні у зразках товщиною $d < 20$ нм (рис. 1 а). Після термообробки (рис. 1 в) вміст оксидної фази у зразках збільшується за рахунок взаємодії з атомами кисню залишкової атмосфери у процесі відпалювання.

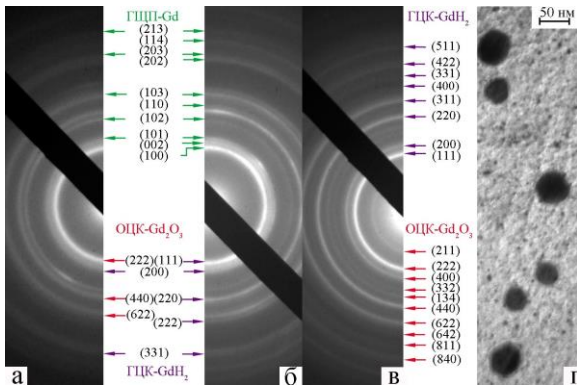


Рис. 1. Електронграми та відповідна їм мікроструктура від одношарових плівок Gd товщиною 15 нм (а, в, г) та 35 нм (б) у свіжосконденсованому стані (а, б) та після термообробки до $T_v = 1000$ К (в, г)

У другому підрозділі наведені результати досліджень структурно-фазового стану тришарових плівок на основі Fe (Co) та Gd. Фазовий склад тришарових плівок до і після термообробки визначається фазовим складом окремих компонентів плівки.

У тришарових плівках на основі Fe (Co) та Gd із квазіаморфним прошарком Gd фіксується такий фазовий стан:

- $\text{ка-Gd} + \text{ОЦК-Fe} \xrightarrow{600\text{K}} \text{ка-Gd} + \text{ОЦК-Fe} \xrightarrow{900\text{K}} \text{ка-Gd} + \text{ОЦК-Fe} + \text{ГЦК-Fe}_3\text{O}_4$;
- $\text{ка-Gd} + \text{ГЦП-Co} + \text{ГЦК-Co(ДП)} \xrightarrow{800\text{K}} \text{ка-Gd} + \text{ГЦП-Co} + \text{ГЦК-Co} \xrightarrow{1000\text{K}} \text{ка-Gd} + \text{ГЦП-Co} + \text{ГЦК-Co}$.

Фазовий склад тришарових плівок із кристалічним прошарком Gd, як і у попередньому випадку, істотно не відрізняється від фазового складу одношарових плівок, компонент систем, за винятком складу прошарку на

основі Gd, у якому, на відміну від одношарових плівок Gd, у свіжосконденсованому стані електронографічно не фіксується оксидна фаза ОЦК-Gd₂O₃, яка починає з'являтися лише після відпалювання вище $T_b = 800$ K (рис. 2).

Дослідження поперечного перерізу тришарових плівок Co/Gd/Co методом АСМ показало, що на межі поділу між шарами існує дифузійна зона. Вона, ймовірно, утворилася за рахунок взаємної конденсаційно-стимульованої дифузії, а її фазовий склад із великою ймовірністю представляє твердий розчин на основі Co і Gd, наявність якого електронографічно не фіксується.

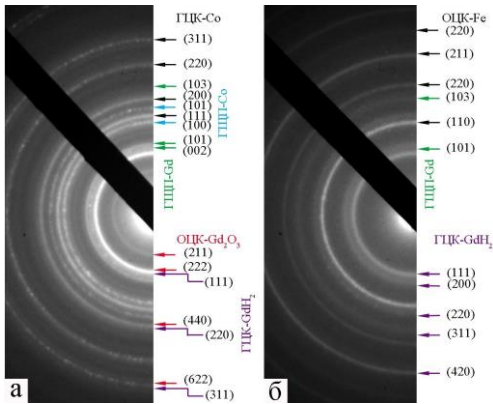


Рис. 2. Електронограми від тришарових плівок Co(5)/Gd(25)/Co(20) (а), Fe(5)/Gd(20)/Fe(20) (б) після термообробки до $T_b = 1000$ та 700 K відповідно. У дужках зазначена товщина в нм

У третьому підрозділі розглядаються особливості процесів фазоутворення у мультишарах на основі Co та Gd. Було показано, що плівки мають фазовий склад ГЦП-Co + ГЦК-Co (ДП) + аморфний Gd.

Методом малокутової рентгенівської дифракції було встановлено, що інтерфейси Gd/Co мають значно меншу шорсткість, ніж інтерфейси Co/Gd. Це означає, що процеси взаємної дифузії більш інтенсивно відбуваються при конденсації Co на Gd, ніж Gd на Co. Дані, отримані за допомогою рентгенівської дифракції, свідчать про початок кристалізації фази аморфного твердого розчину (Co, Gd).

Четвертий розділ «Магнітні властивості приладових структур на основі Fe (Co) та Gd» складається із чотирьох підрозділів.

У першому підрозділі розглянуті магнітні властивості одношарових плівок Fe і Co. У випадку плівок обох металів до і після термообробки при зменшенні ефективної товщини, насичення кривих намагнічування досягається при більших значеннях прикладеного зовнішнього магнітного поля. Загальна намагніченість тонких плівок знижується зі зменшенням товщини.

Для плівок Fe і Co у свіжосконденсованому стані величина коерцитивної сили не проявляє яскраво вираженої розмірної залежності від товщини в

інтервалі 5 – 25 нм. Для плівок Co після термообробки величина коерцитивної сили і характер її залежності майже не змінюються, у той час як у плівок Fe значення B_c збільшується. Це пов'язано з окислювальними процесами, які протікають більш інтенсивно при зменшенні товщини.

Значення залишкової намагніченості із зростанням товщини для плівок Fe у свіжосконденсованому стані збільшується, а для плівок Co в інтервалі товщин 5 – 25 нм розмірної залежності не проявляється. Після відпалювання для плівок Co величина M_r зростає, а її розмірна залежність стала явно вираженою. Для плівок Fe також спостерігається явно виражена розмірна залежність, але значення M_r після відпалювання зменшується. Аналогічно поводить себе залежність намагніченості насичення від товщини.

У *другому підрозділі* наведені результати дослідження магнітних властивостей тришарових плівок на основі Fe (Co) та Gd.

Якщо прошарок Gd знаходиться у квазіаморфному стані, форма петлі гістерезису тришарових плівок (рис. 3) сумарною товщиною шарів Fe та Co такою самою, як товщина одношарової плівки, є подібною до одношарових плівок Fe та Co. При товщині проміжного шару Gd $d > 10$ нм на петлях гістерезису проявляються характерні перегини, що можна пов'язати із почерговим перемагнічуванням шарів Fe або Co, які розділені відносно товстим кристалічним шаром Gd. Це більш виражено для тришарових плівок Fe/Gd/Fe. Зазначені тенденції зберігаються у плівках, які пройшли термообробку.

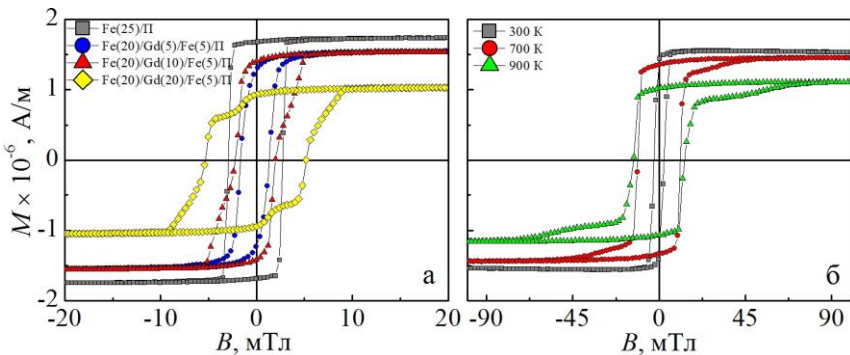


Рис. 3. Залежність намагніченості від прикладеного зовнішнього магнітного поля для одношарової плівки Fe та тришарових плівкових систем Fe / Gd / Fe (a) у свіжосконденсованому стані та для плівки Fe(5) / Gd(10) / Fe(20) / Π до і після термообробки (б)

У *третьому підрозділі* наведені результати досліджень магнітних властивостей мультишарів на основі Co та Gd. При збільшенні кількості повторювань (n) незалежно від ефективної товщини прошарків із Co величина коерцитивної сили збільшується (рис. 4). Такий результат може бути

пов'язаний із тим, що при збільшенні кількості повторювань інтерфейси стають більш дефектними. Величина коерцитивної сили істотно зростає після термообробки, що може свідчити про часткове або повне руйнування інтерфейсів між шарами, а також збільшення концентрації фази ГЦК-Co (рис. 4). Можливо, що при термовідпалюванні на межі поділу Co / Gd за рахунок термодифузії відбувається утворення аморфного твердого розчину (Co, Gd), який має ферімагнітне упорядкування. Таким чином, після термообробки плівкова система може представляти собою шарувату структуру із чергуванням феро- і ферімагнітних шарів (останні перебувають у квазіаморфному стані).

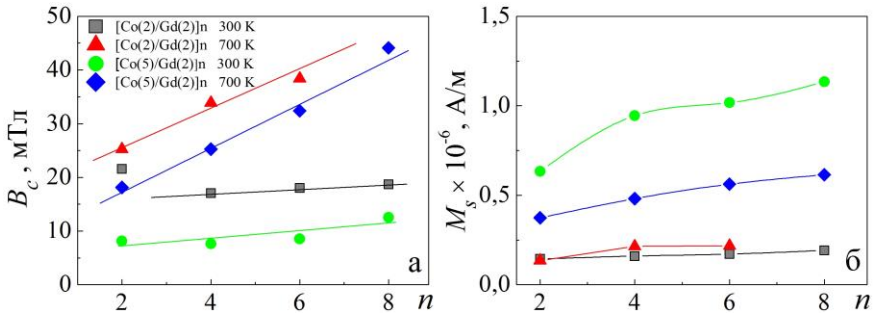


Рис. 4. Залежність величин V_c (а) і M_s (б) мультишарів у паралельній геометрії вимірювання від кількості повторювань, товщини прошарку з Co та температури термообробки

При збільшенні кількості повторювань і товщини прошарку Co, як у свіжосконденсованому стані, так і після термообробки величини M_r і M_s зростають (рис. 4). Це обумовлено збільшенням товщини та концентрації феромагнітної компоненти, яка була розрахована за формулою:

$$c_{Co} = \frac{D_{Co} d_{Co} \mu_{Co}^{-1}}{D_{Co} d_{Co} \mu_{Co}^{-1} + D_{Gd} d_{Gd} \mu_{Gd}^{-1}}, \quad (2)$$

де D – густина; μ – молярна маса елементів; d – ефективна товщина плівки для кожного шару відповідно.

Отримані результати про залежність V_c і M_s (M_r) від n на перший погляд суперечать один одному. Але можна зробити припущення, що у нашому випадку між собою конкурують два механізми, які вносять вклад у магнітні властивості всієї системи. З одного боку, це утворення ферімагнітного твердого розчину і руйнування інтерфейсів між шарами, а з іншого – збереження відносно високої концентрації феромагнітної компоненти. На нашу думку, другий фактор домінує над першим. Причому зростання величин M_r і M_s від n відбувається сильніше, де ефективна товщина Co більша.

Після термообробки зразків до $T_b = 700$ K величини M_r і M_s для систем

$d_{\text{Co}} = 5$ нм зменшуються у середньому на 54 % порівняно зі свіжосконденсованими плівками.

Для підтвердження факту утворення в системі після відпалювання аморфного твердого розчину (Co, Gd) ми провели дослідження магнітних властивостей цих плівок при гелієвих температурах (рис. 5).

При кімнатній температурі форма петлі гістерезису має звичайний вигляд, що пов'язано з перебуванням основної частини Gd у парамагнітному стані ($T_c^{\text{Gd}} = 293$ К). Порівняння петель гістерезису, отриманих при 10 К для плівок до і після термообробки, показало таке. На петлі гістерезису зник перегин (рис. 5 б), що спостерігався при залишковій намагніченості (рис. 5 а). Зникає антиферомагнітна взаємодія, що спостерігалася для плівкових зразків у невідпаленому стані. А той факт, що насичення досягається лише при магнітних полях близько 2 Тл, може бути пояснено руйнуванням періодичної структури та утворенням ферімагнітного аморфного твердого розчину (Co, Gd) у процесі відпалювання.

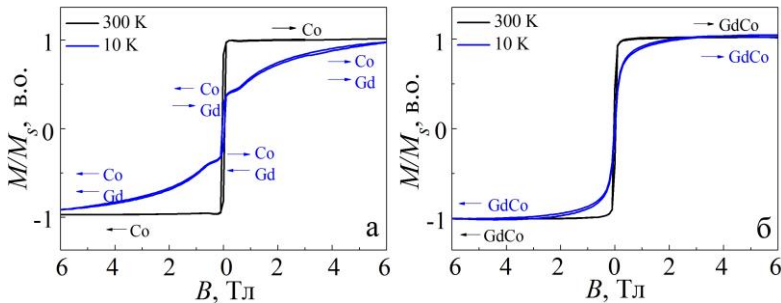


Рис. 5. Залежність намагніченості від магнітного поля, що прикладене в площині плівки для мультишару $[\text{Co}(2)/\text{Gd}(2)]_4$ при 300 і 10 К у свіжосконденсованому стані (а) та після відпалювання (б) до $T_b = 700$ К

У четвертому підрозділі наведені результати дослідження анізотропії магнітних властивостей тришарових плівок та мультишарів Co/Gd, що вивчалися у площині плівки в паралельній геометрії вимірювання. На відміну від тришарових плівок Fe/Gd/Fe зразки на основі Co і Gd характеризуються більшою величиною анізотропії магнітних властивостей у площині плівки, що пояснюється двофазним станом шарів Co. Після термовідпалювання анізотропія в площині плівки стає менш вираженою за рахунок збільшення вмісту фази ГЦК-Co. Це означає, що роздільна здатність і чутливість до зміни кута орієнтації робочого елемента датчика на основі системи Fe/Gd/Fe будуть нижчими, ніж у системи Co/Gd/Co. Тришарові плівки Co/Gd/Co мають більш стабільні магнітні характеристики при зміні товщини окремих шарів і температур. Унаслідок цього у процесі кристалізації у них із меншою ймовірністю можуть змінюватися робочі

характеристики неконтрольованим чином.

Ураховуючи вищезазначені фактори, відмічасмо, що найбільш перспективними з точки зору стабільності магнітних характеристик чутливих елементів датчиків положення є плівкові системи на основі Co і Gd порівняно з плівками на основі Fe і Gd. У зв'язку з цим нами були проведені більш детальні дослідження магнітних характеристик мультишарів $[\text{Co}/\text{Gd}]_n$. Аналіз цих даних показав, що такі мультишари незалежно від кількості повторювань, товщини шару Co і температури відпалювання характеризуються високою магнітною анізотропією у площині плівки. Такий результат обумовлений наявністю у цій системі одноосної магнітної анізотропії та домінуванням механізму перемагнічування – однорідним обертанням вектора намагніченості, що забезпечує мінімальний час перемагнічування. Про це свідчать залежності M_r від кута орієнтації зразка у площині плівки (α), які наведені на рис. 6.

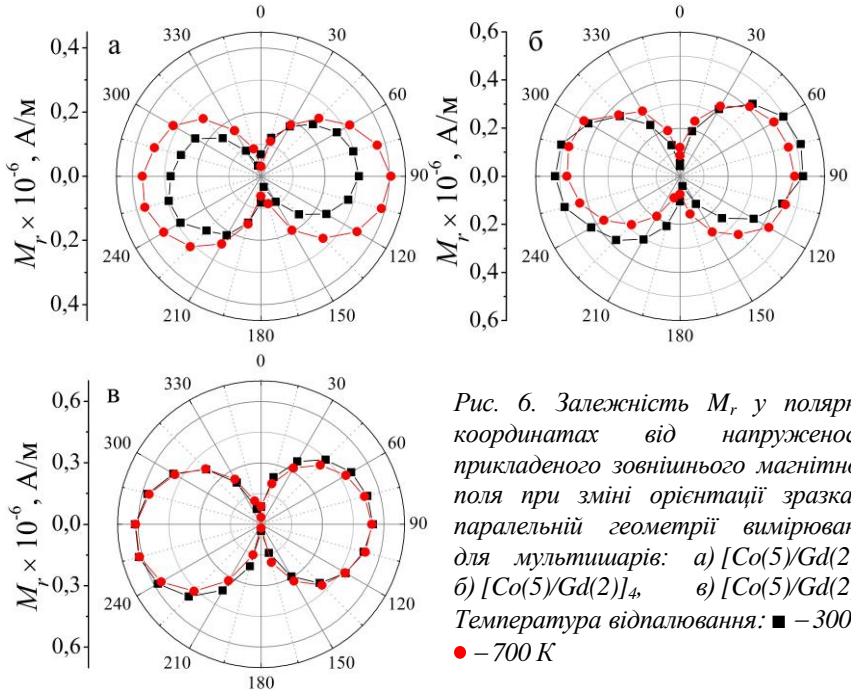


Рис. 6. Залежність M_r у полярних координатах від напруженості прикладеного зовнішнього магнітного поля при зміні орієнтації зразка у паралельній геометрії вимірювання для мультишарів: а) $[\text{Co}(5)/\text{Gd}(2)]_2$, б) $[\text{Co}(5)/\text{Gd}(2)]_4$, в) $[\text{Co}(5)/\text{Gd}(2)]_8$. Температура відпалювання: ■ – 300 K; ● – 700 K

Термообробка плівкових зразків не призводить до істотної зміни залежностей залишкової намагніченості та коерцитивної сили від кута орієнтації зразка при паралельній геометрії вимірювання у зовнішньому магнітному полі. Також у таких системах зберігається анізотропія у площині плівки.

Оскільки мультишари на основі Co та Gd мають велику швидкість

перемагнічування й у поєднанні її з високою термічною стабільністю у широкому діапазоні температур можуть бути використані не лише як чутливий елемент датчика, а і як матеріал для виготовлення носіїв запису і зберігання інформації.

З метою з'ясування можливості використання досліджених у роботі плівкових систем як чутливих елементів різноманітних датчиків положення (кутового і лінійного) та переміщення було вивчено магнітні властивості одношарових і тришарових плівок та мультишарів при переході від паралельної до перпендикулярної геометрії вимірювання. Було показано, що величини M_r і M_s при переході від паралельної до перпендикулярної геометрії вимірювання зменшуються незалежно від температури термообробки. Водночас величина коерцитивної сили зростає, що кількісно узгоджується із розрахунками за законом анізотропії коерцитивної сили:

$$B_c(\alpha) = \frac{B_c(0)}{\cos\beta}, \quad (3)$$

де $B_c(0)$ – значення коерцитивної сили при орієнтації зовнішнього магнітного поля вздовж осі легкого намагнічування.

Кращий збіг розрахункових та експериментальних даних спостерігається для тришарових плівок і мультишарів Co/Gd порівняно з одношаровими плівками. Це підтверджує той факт, що використання плівкових систем як чутливих елементів датчиків або сенсорів є більш доцільним. Кількісне узгодження експериментальних і розрахункових даних на основі (3) дає можливість із високою точністю прогнозувати величину коерцитивної сили при різних кутах у робочому інтервалі (від $\beta = 0^\circ$ до $\beta = 90^\circ$).

П'ятий розділ «Магніторезистивні властивості функціональних матеріалів на основі Fe (Co) та Gd» складається з п'яти підрозділів.

У *першому підрозділі* наведені результати досліджень магніторезистивних властивостей одношарових плівок. Показано, що для них проявляється анізотропний характер залежності магнітоопору від прикладеного зовнішнього магнітного поля, який зберігається і після термообробки. Величина МО для плівок Fe і Co зростає зі збільшенням товщини плівок та не перевищує 0,1 та 0,5 % відповідно.

У *другому підрозділі* наведені результати досліджень магніторезистивних властивостей тришарових плівок у свіжосконденсованому стані. Показано, що вони мають анізотропний характер магнітоопору (рис. 7). Із даних, наведених на рис. 7, відмітимо, що значення величин МО і B_c при переході від перпендикулярної до поперечної орієнтації зменшуються на всьому інтервалі значень кутів у випадку обох систем. Це свідчить про можливість використання тришарових плівок як функціональних елементів датчиків магнітного поля.

Оскільки на величини магнітоопору та коерцитивної сили плівкових систем впливає товщина немагнітних прошарків, то нами було досліджено

польові залежності опору та коерцитивної сили зі зміною товщини квазіаморфного прошарку з рідкоземельного металу від 1 до 10 нм при фіксованих значеннях товщини феромагнітних шарів (рис. 8).

Із цих даних випливає, що величини MO і B_c залежид від товщини шару ка-Gd мають корелюючий між собою осцилюючий характер, що пояснюється осциляційною залежністю обмінної взаємодії між магнітними шарами через електрони провідності. Така залежність спостерігається для всіх геометрій вимірювання.

При переході прошарку Gd із квазіаморфного стану в кристалічний осциляційний характер залежностей MO від d_{ef} зникає у всіх геометріях вимірювання.

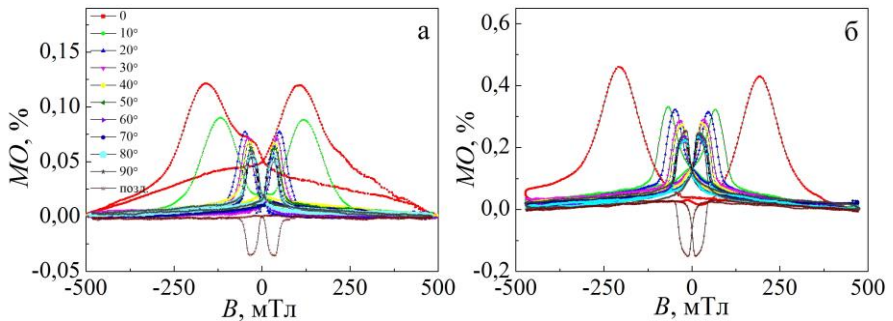


Рис. 7. Залежність величини магнітоопору від прикладеного зовнішнього магнітного поля при переході від перпендикулярної до поперечної геометрії вимірювання із кроком 10° та при поздовжній геометрії для плівок: а – $Fe(2)/ka-Gd(2)/Fe(6)\Pi$; б – $Co(10)/ka-Gd(3)/Co(10)\Pi$

Не менш важливий вплив на величини MO і B_c має товщина шару феромагнетика. Нами експериментально було показано, що величина магнітоопору та коерцитивної сили має осцилюючий характер при зміні ефективної товщини шару Т-металу.

У *третьому* підрозділі проаналізовано вплив термообробки на магніторезистивні властивості тришарових плівок.

Показано, що основні закономірності характеру залежності величини магнітоопору від прикладеного зовнішнього магнітного поля, які проявляються для свіжосконденсованих плівок, також зберігаються для пліткових систем після термообробки.

У *четвертому* підрозділі розглянуті магніторезистивні властивості мультишарів на основі Co і Gd. Показано, що мультишари незалежно від товщини прошарку із Co, кількості повторювань і температури термообробки характеризуються анізотропним MO .

Установлено, що зі збільшенням кількості повторювань незалежно від

температури термообробки величини МО і B_c зростають. Такий результат пов'язаний зі збільшенням кількості інтерфейсів, на яких відбувається розсіювання електронів провідності. Збільшення величини коерцитивної сили зі збільшенням кількості повторювань можна пов'язати зі зменшенням ступеня досконалості меж поділу окремих шарів.

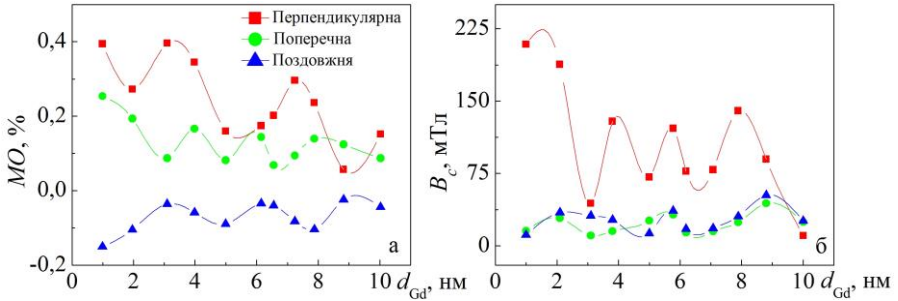


Рис. 8. Залежність величини магнітоопору (а) та коерцитивної сили (б) від ефективної товщини прошарку з ka -Gd для плівкової системи $Co(10)/ka$ -Gd(n)/Co(10)/П, де n – ефективна товщина прошарку з ka -Gd

Після термообробки величина магнітоопору у всіх геометріях вимірювання зростає, хоча необхідно відмітити той факт, що зі збільшенням температури термообробки з $T_b = 600$ до 800 К значення магнітоопору в перпендикулярній і поперечній геометрії зростає, а у поздовжній спадає. Величина коерцитивної сили в перпендикулярній і поперечній геометріях вимірювання збільшується зі зростанням температури відпалювання, а в поздовжній геометрії залежність $B_c(B)$ не має яскраво вираженої розмірної залежності.

Аналіз впливу товщини прошарку із Co на величину магнітоопору та коерцитивної сили показав, що при збільшенні ефективною товщини прошарку із Co з 2 до 5 нм незалежно від температури термообробки та кількості повторювань величина МО зростає. Це свідчить на користь того, що основний внесок у величину МО дає кобальтова підсистема. Величина коерцитивної сили при збільшенні ефективною товщини прошарку із Co з 2 до 5 нм зменшується.

У *n'*ятому підрозділі було розглянуто можливості практичного застосування плівкових систем на основі Fe (Co) та Gd для створення функціональних елементів магнітоелектроніки. Було проведено розрахунок величини чутливості плівок до магнітного поля із використанням співвідношення:

$$S_B = \Delta R(\Delta R/R(B_S))_{\max}/\Delta B, \quad (4)$$

де $(\Delta R/R(B_S))_{\max}$ – максимальне значення магнітоопору; ΔB – зміна магнітної індукції від насичення (B_s) до розмагнічування.

Таблиця 1

Значення параметрів чутливих елементів та їх можливі практичні області застосування

Структура чутливого елемента	Товщина, нм	T_b , К	S_B , %/Гл	КП	B_c , мТл	Області застосування
Fe/Gd/Fe	$d_{Fe} = 1 - 30$; $d_{Gd} = 1 - 25$	460	~ 1,1 %	0,85 – 0,93	2 – 16	<ul style="list-style-type: none"> Чутливі елементи індукційних датчиків (робочий діапазон кутів положення зразка відносно прикладеного магнітного поля 0 – 90°). Конструктивні елементи спіні-вентилів
		700	~ 0,7 %	0,88 – 0,93	4 – 16	
		900	–	0,92	22	
Co/Gd/Co	$d_{Co} = 1 - 30$; $d_{Gd} = 1 - 25$	460	~ 3 %	0,61 – 0,92	1,5 – 3	<ul style="list-style-type: none"> Чутливі елементи індукційних датчиків (робочий діапазон кутів положення зразка відносно прикладеного магнітного поля 0 – 90°). Конструктивні елементи АМР-датчиків (робочий діапазон кутів положення зразка відносно прикладеного магнітного поля 0 – 90°)
		800	~ 2 %	0,67 – 0,95	1,7 – 2,5	
		1000	–	0,89	7 – 8	
[Co/Gd] _n	$d_{Co} = 2 - 5$; $d_{Gd} = 2$; $n = 2 - 8$	300	~ 4,5 %	0,98 – 0,99	0,7 – 1,7	<ul style="list-style-type: none"> Чутливі елементи індукційних датчиків (робочий діапазон кутів положення та повороту в площині зразка відносно прикладеного магнітного поля 0 – 90°, 0 – 360°). Конструктивні елементи АМР-датчиків (робочий діапазон кутів положення зразка відносно прикладеного магнітного поля 0 – 90°). Середовище для магнітного запису інформації
		700	~ 5 %	0,97 – 0,99	1,8 – 4,5	

Магнітна чутливість плівкових систем у свіжосконденсованому стані та після термообробки зростає при переході від перпендикулярної геометрії вимірювання до поперечної. Для плівок у свіжосконденсованому стані залежність S_B від α має лінійний характер, що зникає після термообробки в інтервалі 700 – 1000 К. Також після термообробки чутливість зазначених плівкових систем зменшується.

Аналіз та узагальнення результатів досліджень дозволили встановити можливі області практичного використання плівкових систем на основі Fe (Co) та Gd (табл. 1) та визначити подальші напрямки прикладних досліджень і розробок.

ВИСНОВКИ

1. На основі досліджень структурно-фазового стану встановлено:

- плівки Fe після термообробки до граничної температури T_o , значення якої є розмірно-залежною величиною і змінюється від 550 до 720 К в інтервалі товщин 15 – 150 нм, мають ОЦК-решітку з параметром, що співпадає з даними для масивних зразків; збільшення температури відпалювання викликає зародження у плівках Fe оксидної фази Fe_3O_4 ;
- одношарові плівки Co після термообробки при температурах 800 і 1000 К мають фазовий склад ГЦП-Co + ГЦК-Co;
- при ефективних товщинах одношарових плівок Gd менше 10 нм у них електронографічно фіксується квазіаморфна фаза; при більших товщинах ($d_{Gd} \approx 10 - 40$ нм) у невідпаленому стані плівки Gd мають фазовий склад ГЦП-Gd + ГЦК-GdH₂ зі слідами ОЦК-Gd₂O₃; термообробка до $T_b = 800$ і 1000 К істотно не впливає на фазовий склад, хоча спостерігається збільшення вмісту оксидної фази;
- фазовий склад тришарових плівкових систем на основі Fe (Co) та Gd до і після термообробки визначається фазовим складом окремих компонентів системи, хоча у прошарку із кристалічного Gd ($d_{Gd} > 15$ нм) оксидної фази не фіксується;
- мультишари на основі Co і Gd у свіжосконденсованому стані мають фазовий склад ГЦП-Co + ГЦК-Co (ДП) + аморфний Gd; після термообробки структурно-фазовий стан не зазнає значних змін, хоча на інтерфейсі починається зародження фази аморфного твердого розчину (Co, Gd).

2. Магнітні властивості одношарових плівок Co та Fe і тришарових систем на основі Fe (Co) та Gd корелюють зі структурно-фазовим складом, зокрема:

- в одношарових плівках Co і Fe, у невідпаленому стані й після термообробки не спостерігається явно вираженої розмірної залежності величини коерцитивної сили;
- під час використання прошарків із кристалічного Gd ($d_{Gd} > 10$ нм) відбувається пошарове перемагнічування шарів;

- для систем із квазіаморфним прошарком Gd ($d_{\text{Gd}} < 10$ нм) коерцитивна сила має менше значення, ніж із кристалічним;
- термовідпалювання у діапазоні температур 700 – 1000 К у більшості випадків призводить до зростання величини коерцитивної сили в одношарових та тришарових плівках;
- для тришарових плівок після відпалювання на залежностях намагніченості від прикладеного зовнішнього магнітного поля проявляються характерні ділянки, що можна пов'язати з розмиттям інтерфейсів за рахунок протікання дифузійних процесів;
- вивчення магнітних властивостей мультишарів на основі Co і Gd у діапазоні температур від 10 до 300 К підтвердив факт утворення аморфного ферімагнітного твердого розчину (Co, Gd) після відпалювання до $T_b = 700$ К.

3. Для тришарових плівок на основі Fe (Co) і Gd та мультишарів $[\text{Co}(x)/\text{Gd}(2)]_n$ у свіжосконденсованому стані та після термообробки залежність МО від прикладеного зовнішнього магнітного поля має анізотропний характер. Найбільше значення МО спостерігається у перпендикулярній геометрії вимірювання та становить 0,1 % для плівок Fe/ка-Gd/Fe/П і 0,5 % для плівок Co/ка-Gd/Co/П.

4. При зміні ефективної товщини прошарку з квазіаморфного-Gd у межах 1 – 10 нм та верхнього шару Fe (Co) у межах 1÷5 нм величини магнітоопору та коерцитивної сили мають осцилюючий характер в усіх геометріях вимірювання, що зникає при переході Gd до кристалічного стану при $d_{\text{Gd}} > 10$ нм.

5. Дослідження магнітних і магніторезистивних властивостей плівкових систем на основі Fe (Co) і Gd дозволили встановити області їх можливого практичного застосування, а саме:

- тришарові плівки на основі Co і Gd мають стабільні магнітні характеристики при зміні товщини окремих шарів і термообробки та є перспективними матеріалами з точки зору виготовлення чутливих елементів датчиків положення і переміщення;
- мультишари на основі Co та Gd мають велику швидкість перемагнічування й у поєднанні її з високою термічною стабільністю у широкому діапазоні температур можуть бути використані як матеріал для виготовлення носіїв запису і зберігання інформації;
- тришарові плівки і мультишари на основі Co і Gd характеризуються високими показниками коефіцієнтів прямокутності петлі гістерезису і чутливості до магнітного поля, на які фактично не впливає термообробка до $T_b = 700$ К, що дозволяє розглядати їх як перспективний матеріал під час виготовлення функціональних елементів АМР-датчиків;
- тришарові плівки Fe/Gd/Fe мають відносно високі значення коерцитивної сили та можуть бути використані як функціональні елементи спін-вентильних структур.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати

1. Sensitive element of the magnetic field sensor based on three-layer film system Co/X/Co (X = Dy, Gd) / [S. I. Vorobiov, O. V. Shutylieva, I. M. Pazukha, A. M. Chornous] // *Tech. Phys.* – 2014. – V. 59, № 11. – P. 1644 – 1649.

2. Фазовий склад та магнітні властивості плівкових систем на основі Fe (Co) та Gd (Dy) / [С. І. Воробійов, І. В. Чешко, А. М. Черноус, Х. Ширзадфар, О. В. Шутильєва] // *Ж. нано- та електрон. фіз.* – 2014. – Т. 6, № 2. – С. 02022-1 – 02022-8.

3. Магнетні властивості приладових структур на основі Co та Gd / [С. І. Воробійов, Л. В. Дехтярук, А. М. Черноус, Т. М. Шабельник] // *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології.* – 2014. – Т. 12, № 2. – С. 405 – 414.

4. Вплив температури на фазовий склад, електрофізичні та магніторезистивні властивості плівкових систем на основі Co, Fe та Gd / [С. І. Воробійов, І. В. Чешко, А. М. Черноус, І. О. Шпетний] // *Металлофіз. новітні технології.* – 2013. – Т. 35, № 12. – С. 1645 – 1658.

5. S. I. Vorobiov The dependence of the magnetoresistance on the orientation of three-layer film systems based on Co / n / Co (n = Gd, Dy, Bi) in an external magnetic field / [S. I. Vorobiov, O. V. Shutylieva, A. M. Chornous] // *Proc. Conf. NAP.* – 2013. – V. 2. – P. 01NFPMM08-1 – 01NFPMM08-4.

6. Фазовий склад та електрофізичні властивості плівок заліза / [С. І. Воробійов, Л. В. Однорець, О. В. Пилипенко, А. М. Черноус] // *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології.* – 2012. – Т. 10, № 4. – P. 829 – 840.

7. Магніторезистивні властивості плівкових систем на основі Fe і Gd та Co і Gd / [С. І. Воробійов, О. В. Шутильєва, І. О. Шпетний, А. М. Черноус] // *Ж. нано- та електрон. фіз.* – 2012. – Т. 4, № 4. – С. 04026-1 – 04026-5.

2. Наукові праці апробаційного характеру

8. С. І. Воробійов Фазовий склад і кристалічна структура двошарових плівок на основі Fe та Gd: Conference of Electronic Engineering and Technology in the 12th International Youth Forum [«Electronics and Youth in the XXI century»] / [С. І. Воробійов]. – Харків: ХНУРЕ, 2011. – С. 31 – 32.

9. Structural and phase composition and magnetic properties of three-layers films systems based on Fe and Gd: International conference of students and young scientists [«HEUREKA – 2012»], (Lviv, April 19 – 22, 2012) / [S. Vorobiov, A. Chornous, T. Hauet, M. Hehn, S. Mangin, H. Shirzadfar]. – Lviv: LNU, 2012.– P. 36.

10. S. I. Vorobiov Magnetic properties three-layers film systems based on Co and Gd or Dy: International research and practice conference [«Nanotechnology and

nanomaterials» (NANO – 2014)], (Yaremche-Lviv, 23 – 30 August 2014) / [S. I. Vorobiov, O. V. Shutyleva, A. M. Chornous]. – Yaremche-Lviv, 2014. – P. 271.

11. **Воробйов С. І.** Магнітні властивості приладових структур на основі Co та Gd: матеріали та програма науково-технічної конференції [«Фізика, електроніка, електротехніка» (ФЕЕ – 2014)], (Суми, 21 – 26 квітня 2014 р.) / [С. І. Воробйов, Т. М. Шабельник, І. О. Шпетний]. – Суми: СумДУ, 2014. – С. 131.

12. T. Shabelnyk Magnetic properties of film systems based on Co and Gd: International conference of students and young scientists [«HEUREKA – 2014»], (Lviv, May 15 – 17, 2014) / [T. Shabelnyk, O. Shutyleva, S. Vorobiov]. – Lviv: LNU, 2014. – P. 122.

13. Т. М. Шабельник Вплив термообробки на магнітоопір тришарових плівкових систем на основі Co та Gd: Матеріали та програма науково-технічної конференції [«Фізика, електроніка, електротехніка» (ФЕЕ – 2013)], (Суми, 22 – 27 квітня 2013 р.) / [Т. М. Шабельник, С. І. Воробйов]. – Суми: СумДУ, 2013. – С. 96.

14. Study of magnetoresistive properties of thin film systems based on Co and Gd or Dy: International conference of the physics and technology of thin films and nanosystems [ICPTTFN-XIV], (Ivano-Frankivsk, May 20 – 25, 2013) / [S. I. Vorobiov, O. V. Shutyleva, I. O. Shpetnyi, A. M. Chornous]. – Ivano-Frankivsk, 2013. – P. 424.

15. Influence of the heat treatment on the magnetoresistive properties of film systems based on Co and Cr, Bi or Gd: International conference of students and young scientists [«HEUREKA-2013»], (Lviv, May 15 – 17, 2013) / [O. Shutyleva, D. Kondrakhova, S. Vorobiov, A. Chornous]. – Lviv: LNU, 2013. – P. A30.

АНОТАЦІЯ

Воробйов С. І. Вплив процесів фазоутворення на магнітні і магніторезистивні властивості приладових структур на основі Fe (Co) та Gd. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем. – Сумський державний університет, Суми, 2015.

Дисертація присвячена встановленню загальних закономірностей у магнітних і магніторезистивних властивостях приладових структур на основі плівкових нанорозмірних систем із перехідних феромагнітних (Fe, Co) і рідкоземельного (Gd) металів та з'ясуванню впливу на них процесів фазоутворення й орієнтації зразка у зовнішньому магнітному полі.

Установлено взаємозв'язок між особливостями структурно-фазового стану приладових структур у вигляді тришарових плівкових систем і мультишарів та їх магнітними й магніторезистивними властивостями. Показано, що при зміні товщини прошарку з ka-Gd залежність магнітоопору і коерцитивної сили має осцилюючий характер, який зникає при переході прошарку Gd у кристалічний

стан. Утворення на інтерфейсах ферімагнітного твердого розчину (Fe (Co), Gd) призводить до істотних змін магнітних властивостей.

Досліджено вплив орієнтації зразка у зовнішньому магнітному полі на величину магнітоопору, коерцитивної сили та намагніченості плівкових систем. Проведено розрахунок величини чутливості до магнітного поля та прямокутності петель гістерезису плівкових систем. Запропоновано можливі області використання плівкових систем на основі Fe (Co) і Gd.

Ключові слова: мультишари, тонкі плівки, фазоутворення, рідкоземельний метал, чутливий елемент датчика, магнітоопір, коерцитивна сила, залишкова намагніченість, намагніченість насичення.

АННОТАЦИЯ

Воробьев С. И. Влияние процессов фазообразования на магнитные и магниторезистивные свойства приборных структур на основе Fe (Co) и Gd. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – физика приборов, элементов и систем. – Сумский государственный университет, Сумы, 2015.

Диссертация посвящена установлению общих закономерностей в магнитных и магниторезистивных свойствах приборных структур на основе пленочных наноразмерных систем с переходных ферромагнитных (Fe, Co) и редкоземельного (Gd) металлов и выяснения влияния на них процессов фазообразования и ориентации образца во внешнем магнитном поле.

Установлена взаимосвязь между особенностями структурно-фазового состояния приборных структур в виде трехслойных пленочных систем и мультислоев с их магнитными и магниторезистивными свойствами.

Показано, что в трехслойных пленках Fe (Co)/Gd/Fe (Co) в случае, когда слой с Gd находится в кристаллическом состоянии, происходят послойное перемагничивание и рост величины коэрцитивной силы относительно пленок, в которых слой с Gd находится в квазиаморфном состоянии. В мультислоях [Co/Gd] при увеличении количества фрагментов происходит рост величины коэрцитивной силы, а также остаточной намагнитченности и намагнитченности насыщения за счет размытия интерфейсов и увеличения концентрации ферромагнитной компоненты, соответственно. Установлено, что при изменении толщины слоя с ka-Gd зависимость магнитосопротивления и коэрцитивной силы имеет осциллирующий характер, исчезающий при переходе слоя Gd в кристаллическое состояние. Увеличение количества повторений в мультислоях [Co/Gd] приводит к росту величины магнитосопротивления.

Экспериментально показано, что термообработка во всех случаях приводит к изменению магнитных и магниторезистивных свойств за счет изменения структурно-фазового состояния, а именно рекристаллизации,

частичного окисления и диффузных процессов, в результате которых на интерфейсах образуется аморфный твердый раствор (Fe (Co), Gd) с ферримагнитным упорядочением, что приводит к исчезновению антиферромагнитного взаимодействия между слоями.

Исследовано влияние ориентации образца во внешнем магнитном поле на величину магнитосопротивления, коэрцитивной силы и намагниченности пленочных систем. Проведен расчет величины чувствительности к магнитному полю и прямоугольности петель гистерезиса пленочных систем. Предложены возможные области использования пленочных систем на основе Fe (Co) и Gd.

Ключевые слова: мультислой, тонкие пленки, фазообразование, редкоземельный металл, чувствительный элемент датчика, магнитосопротивление, коэрцитивная сила, остаточная намагниченность, намагниченность насыщения.

ABSTRACT

Vorobiov S. I. The influence of phase formation processes on magnetic and magnetoresistive properties of device structures based on Fe (Co) and Gd. – Manuscript.

The thesis for a Doctor of Philosophy (Ph. D.) degree in Physics and Mathematics on speciality 01.04.01 – Physics of Devices, Components and Systems. – Sumy State University, Sumy, 2015.

The thesis is devoted to determination of general patterns in magnetic and magnetoresistive properties of device structures based on the nanoscale film systems of ferromagnetic transition (Fe, Co) and rare earth (Gd) metals and investigation of the influence on the processes of phase formation and orientation of the sample in an external magnetic field.

The relationship between the peculiarities of structural and phase state of device structures in the form of three-layer film systems and multilayers and their magnetic and magnetoresistive properties are established. It is shown that by changing the thickness of the layer of the qa-Gd dependence of magnetoresistance and coercive force has oscillating character which transition layer of Gd disappears in the crystalline state. Formation on interfaces ferrimagnetic solid solution (Fe (Co), Gd) leads to significant changes of magnetic properties.

The influence of the sample orientation in an external magnetic field on the value of the magnetoresistance, the coercive force and magnetization of film systems are investigated. The value of sensitivity to the magnetic field and the squareness of the hysteresis loops of film systems are calculated. The possible fields of application of the film systems based on Fe (Co) and Gd are proposed.

Keywords: multilayers, thin films, phase formation, rare earth metal, sensing element, magnetoresistance, coercive force, residual magnetization, saturation magnetization.

Підписано до друку 27.03.2015.
Формат 60x90/16. Ум. друк. арк. 1,1. Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 100 пр. Зам. № 367

Видавець і виготовлювач
Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.