

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Шутильова Ольга Вікторівна

УДК 538.975:[537.621.2+537.622+681.586.7]

**ФАЗОВИЙ СКЛАД ТА МАГНІТОРЕЗИСТИВНІ І МАГНІТНІ
ВЛАСТИВОСТІ ПРИЛАДОВИХ СТРУКТУР
НА ОСНОВІ Ni I Co ТА Dy АБО Bi**

Спеціальність 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Суми – 2021

Дисертацією є рукопис.

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

Наукові керівники: доктор фізико-математичних наук, професор
Чорноус Анатолій Миколайович,
проректор із наукової роботи,
Сумський державний університет;

доктор наук, професор
Стефан Манжин (Stephan Mangin),
завідувач відділу наномагнетизму і спінтроніки,
Університет Лотарингії, м. Нансі (Франція).

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Дехтярук Леонід Васильович,
професор кафедри фізики Харківського національного
університету будівництва та архітектури, м. Харків;

кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Петрушенко Сергій Іванович,
Харківський національний університет
імені В. Н. Каразіна,
старший науковий співробітник
кафедри експериментальної фізики, м. Харків.

Захист відбудеться ____ вересня 2021 р. о 12:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 55.051.02 Сумського державного університету за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, корпус БІЦ, ауд. 307. E-mail: d55.051.02@sumdu.edu.ua.

Із дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Сумського державного університету за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, а також на сайті інституційного репозиторію СумДУ. Режим доступу:
<https://sumdu.edu.ua/uk/science/science-info/scientific-infrastructure/specialized-council/111-55-051-02.html>.

Автореферат розіслано ____ серпня 2021 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

Ю. О. Шкурдода

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У плівкових системах на основі рідкоземельних (РЗ) і 3d-перехідних металів (ПМ) магнітні та магніторезистивні властивості визначаються умовами обмінної взаємодії між електронами незаповнених енергетичних рівнів оболонки атомів. Аморфна структура матеріалів характеризується невпорядкованим розташуванням атомів, що істотно впливає на властивості системи порівняно з кристалічними структурами. Плівкові системи на основі к-ПМ і а-РЗ (к – кристалічна фаза, а – аморфна фаза) металів в аморфному стані можуть мати значну перпендикулярну анізотропію, завдяки цьому їх можна використовувати при створенні магнітних носіїв інформації, елементів спінової електроніки тощо. У процесі дослідження таких систем особливу увагу звертають на магнітні, магнітооптичні, магніторезистивні та їх структурні властивості з точки зору можливого використання як функціональних елементів сенсорів.

Властивості плівкових систем, що містять прошарки з рідкоземельного металу, на час постановки задачі не були досліджені повною мірою. Проте, низка цікавих особливостей була зафіксована в таких системах: зменшення сили взаємозв'язку між магнітними шарами зі збільшенням товщини прошарку, аномальні петлі гістерезису тощо.

На інтерфейсах багатшарових систем на основі феромагнітних металів та бісмуту не утворюються сполуки, що впливає на особливості обмінної взаємодії, яка потребує подальшого вивчення. У плівкових структурах або сплавах, що містять діамагнітні шари Ві, проявляються висока магнітооптична активність та гігантські магнітооптичні ефекти, тому вони мають прикладні перспективи.

Таким чином, із точки зору практичного застосування систем РЗ/ПМ та Ві/ПМ як функціональних елементів необхідно встановити взаємозв'язок між їх структурно-фазовим станом, магніторезистивними і магнітними властивостями плівкових систем. Актуальність такого роду завдання визначила мету дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота виконана на кафедрі електроніки, загальної та прикладної фізики Сумського державного університету у рамках НДР: «Структурно-фазовий стан та магніторезистивні властивості плівкових систем» № 0112U004688 (2012–2016 рр.). Дисертантка брала участь у проведенні наукових досліджень і під час підготовки проміжних та заключних звітів. Проходила наукове стажування у 2013–2014 роках за державною програмою 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).

Мета і задачі досліджень. Установлення взаємозв'язку структурно-фазового стану та магнітних і магніторезистивних властивостей тришарових плівкових

систем із перехідних феромагнітних металів (Ni, Co) і Dy або Bi при різних орієнтаціях зразків у зовнішньому магнітному полі. Відповідно до поставленої мети роботи необхідно було вирішити такі наукові задачі:

- отримати серії одношарових плівок Ni, Co, Dy і Bi та зразки у вигляді тришарових плівок Co/Dy/Co/Π, Ni/Dy/Ni/Π, Co/Bi/Co/Π (Π – підкладка) і провести їх термообробку у діапазоні температур 680–1000 К;

- дослідити фазовий склад та кристалічну структуру отриманих плівок;

- дослідити магнітні і магніторезистивні властивості одношарових плівок Co і Ni та тришарових плівок у свіжосконденсованому стані і після термообробки;

- встановити вплив товщини проміжних шарів із Dy і Bi та шарів феромагнетика на магнітні і магніторезистивні характеристики;

- встановити вплив орієнтації плівкових зразків у зовнішньому магнітному полі на величину магніторезистивних і магнітних характеристик;

- визначити коерцитивну силу (B_c), величину чутливості (S_B), величину магнітоопору (MO), коефіцієнт прямокутності петель гістерезису (KII) плівкових систем;

- провести аналіз узагальнених результатів щодо впливу структурно-фазового стану, товщини окремих шарів на магнітні і магніторезистивні властивості тришарових плівок;

- установити можливість практичного застосування відповідних плівкових систем як функціональних елементів спінтроніки і сенсорики.

Об'єкт дослідження – процеси фазоутворення та магнітні і магніторезистивні властивості функціональних елементів приладових структур у вигляді тришарових плівкових систем.

Предмет дослідження – фазовий склад, кристалічна структура, магнітоопір, коерцитивна сила, величина чутливості, залишкова намагніченість, намагніченість насичення одно- (Ni і Co) та тришарових плівок на основі Ni (Co) і Dy або Bi у свіжосконденсованому стані та після термообробки при різних орієнтаціях зразків у зовнішньому магнітному полі.

Методи дослідження – пошарова конденсація металів у вакуумі, просвічуюча електронна мікроскопія (ПЕМ) і електроннографія, високоточна резистометрія під час вимірювання магнітоопору при паралельній, перпендикулярній і поперечній геометріях, вібраційна магнітометрія, загальнологічні методи досліджень (аналіз, синтез та узагальнення результатів).

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Установлено, що свіжосконденсовані плівки (за $T_n \cong 460$ К) Co/Bi/Co мають фазовий склад ГЦП-Co + ГЦК-Co + ромбодричний-Bi. У системі Co (5)/Bi (x)/Co (10)/Π (у дужках зазначена товщина шару у нм) після відпалювання за температури 900 К при товщині $d_{Bi} \leq 5$ нм повністю окислюється шар Bi і переходить в аморфний стан. Зі збільшенням d_{Bi} фіксується тетрагональна фаза Bi_2O_3 .

2. Уперше показано, що залежність величини магнітоопору тришарових плівок Co/Dy/Co, Ni/Dy/Ni від ефективної товщини прошарку від

квазіаморфного Dy ($d_{Dy} < 15$ нм) має немонотонний характер.

3. Установлено взаємозв'язок магнітних та магніторезистивних властивостей матеріалів функціональних елементів на основі Ni (Co) і Dy або Bi з їх структурно-фазовим складом залежно від товщини окремих шарів. У цьому разі вперше показано таке:

- при переході прошарку Dy із квазіаморфного стану в кристалічний зникає немонотонний характер залежностей МО від ефективної товщини Dy;

- наявність прошарку з кристалічного Dy приводить до збільшення коерцитивності тришарових плівок;

- максимальні значення величини магнітоопору для системи Co/Dy/Co спостерігаються в перпендикулярній геометрії вимірювання (0,6 %), коли Dy перебуває в квазіаморфному стані;

- встановлено, що як до, так і після термообробки до 680 К збільшення товщини шару Bi (5–30 нм) призводить до зменшення величин намагніченості насичення та залишкової намагніченості.

4. Уперше встановлено близький до лінійного характер залежності МО від зміни орієнтації зразка при переході від перпендикулярної до поперечної геометрії вимірювання плівок Co/Bi/Co в інтервалі кутів від 0° до 90° , а для Co/Dy/Co – від 30° до 90° , що дозволяє розглядати такі плівкові зразки як чутливі елементи індукційних датчиків.

Практичне значення одержаних результатів. Одержані в роботі результати мають як фундаментальне, так і прикладне значення і можуть бути використані в подальших дослідженнях та розробках. Фундаментальне значення результатів полягає в тому, що вони розширюють уявлення про процеси фазоутворення в плівкових зразках та розкривають їх нові магнітні і магніторезистивні властивості.

Прикладний характер результатів полягає в тому, що на їх основі можна розробляти функціональні елементи індукційних датчиків положення, анізотропні магніторезистивні датчики положення і кута повороту, магнітного середовища запису інформації, що будуть мати стабільні робочі характеристики в широкому діапазоні температур.

Особистий внесок здобувача полягає в самостійному пошуку та аналізі літературних джерел, проведенні експериментальних досліджень. Автор особисто отримувала зразки, проводила дослідження їх структурно-фазового стану, магнітних і магніторезистивних властивостей, здійснювала обробку та аналіз одержаних результатів. Постановку задач досліджень та узагальнення експериментальних результатів проведено спільно з науковим керівником д-ром фіз.-мат. наук, проф. А.М. Черноусом. В обговоренні результатів роботи брали участь канд. фіз.-мат. наук С.І. Воробйов та канд. фіз.-мат. наук, доц. І.М. Пазуха (щодо структурно-фазового стану, магнітних і магніторезистивних властивостей) та співробітник Університету Лотарингії (м. Нансі, Франція) проф. С. Манжин (щодо магнітних властивостей).

У працях [1-2] здобувач провела комплексні дослідження особливостей

структурно-фазового стану, магнітних і магніторезистивних властивостей тришарових плівкових систем на основі Co і Dy, а також виконала розрахунки. Текст статті підготовлено в співавторстві.

У працях [3-4] здобувач провела дослідження структурно-фазового стану, вимірювання магнітоопору та магнітних характеристик, коерцитивної сили, залишкової намагніченості та намагніченості насичення тришарових плівкових систем на основі Ni (Co) і Dy. Текст статті підготовлено в співавторстві.

У праці [5] здобувач здійснила комплексні дослідження впливу термообробки на структурно-фазовий стан, магнітні та магніторезистивні властивості у тришарових плівкових системах на основі Co і Bi. Текст статті підготовлено в співавторстві.

У праці [6] здобувач провела комплексні дослідження структурно-фазового стану та магнітних властивостей одношарових плівок феромагнітних металів, одноосібно плівок Ni та спільно із С.І. Воробйовим плівок Co. Текст статті підготовлено в співавторстві.

У праці [7] здобувач одержала результати досліджень впливу зовнішнього магнітного поля на величину магнітоопору в плівкових системах Co і Dy або Bi. Дисертантка особисто проводила розрахунки величини магнітоопору та величини чутливості. Окремі розділи статті підготувала особисто.

Основні результати наукових досліджень автор доповідала особисто на наукових семінарах і конференціях [8–17]. Усі наукові положення і висновки, що винесені на захист, належать авторові дисертації.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові й практичні результати роботи оприлюднені та обговорені на таких конференціях: International conference of students and young researchers in theoretical and experimental physics «HEUREKA» (м. Львів, 2013–2014 pp.); 3th International Conference «Nanomaterials: Applications and Properties – 2013» (м. Алушта, 2013 p.); «International Conference of the Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems, ICPTTFN-XIV» (м. Івано-Франківськ, 2013 p.); International research and practice conference «Nanotechnology and Nanomaterials» (Яремче–Львів, 2014–2015 pp.); науково-технічних конференціях «Фізика, електроніка, електротехніка» (м. Суми, 2013–2017 pp.).

Публікації. Результати дисертації опубліковані в 17 працях: 6 статей у періодичних наукових журналах, що індексуються БД Scopus та/або WoS, зокрема 2 у фахових і 4 у закордонних виданнях, і 1 стаття в матеріалах конференції, що індексується БД Scopus та 10 тез доповідей у матеріалах міжнародних і всеукраїнських конференцій.

Структура і зміст роботи. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних джерел. Вона викладена на 160 сторінках, із яких 95 сторінок основного тексту, 68 рисунків і 18 таблиць, зокрема, 23 рисунки і 9 таблиць на 32 окремих аркушах. Список використаних джерел складається з 152 найменувань на 15 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета й основні задачі дослідження, визначені основні методи досліджень та наукова новизна, практичне значення одержаних результатів і відзначений зв'язок роботи з науковими темами та науково-дослідними проєктами. Наведено інформацію про апробацію одержаних експериментальних результатів, особистий внесок здобувача та структуру дисертаційної роботи.

У **першому розділі** «Процеси фазоутворення, магнітні та магніторезистивні властивості плівкових матеріалів на основі феромагнітних та рідкоземельних металів або бісмуту», що є літературним оглядом, наведено аналіз теоретичних та експериментальних даних про фазовий склад і кристалічну структуру, магнітних та магніторезистивних властивостей плівкових систем на основі феромагнітних і рідкоземельних металів та бісмуту. Зокрема, в *першому підрозділі* подано літературні дані щодо процесів фазоутворення і взаємної дифузії у плівкових системах та сплавах на основі Ni, Co і Ду або Ві. Показано, що плівки рідкоземельних металів можуть перебувати в аморфному стані в широкому діапазоні товщин. Залежно від умов отримання й термообробки в плівках Ду може стабілізуватися як фаза ГЦП-Ду, так і оксидна ОЦК-Ду₂О₃.

У плівках Ві, отриманих за температури підкладки більше ніж 450 К, реалізується механізм конденсації «пара → рідина», що виявляється формуванням крапельної структури. За нижчих температур підкладки плівки мають полікристалічну структуру, що є наслідком реалізації механізму конденсації «пара → кристал». Фазовий склад плівок відповідає ромбодричному Ві.

У *другому підрозділі* наведені результати досліджень магніторезистивних властивостей плівок. Показано, що в тонких плівках на основі РЗ-ПМ металів залежно від температури вимірювання, фазового складу і співвідношення концентрації компонентів феромагнетиків та Ду може бути анізотропний магнітоопір та гігантський магнітоопір (ГМО). У мультишарах [Co (1)/Vi (2,5)]_n, отриманих методом магнетронного розпилення, було досягнуто 80 % ГМО в поздовжній геометрії вимірювання за температури 10 К. У сплавах ДуNiVi за тої самої температури і магнітних полів менше ніж 0,6 Тл виявляється ефект ГМО на рівні 3 %.

У *третьому підрозділі* надані результати досліджень магнітних властивостей плівок на основі феромагнітних та рідкоземельних металів або Ві. У плівках на основі РЗ-ПМ металів виявляється немонотонна залежність намагніченості від температури, що обумовлено різними температурними залежностями намагніченості для феромагнітних і рідкоземельних металів. Показана можливість прикладного застосування зазначених плівкових матеріалів як чутливих елементів приладових структур.

У **другому розділі** «Методика і техніка експерименту» описано методику формування зразків та умови термообробки, дослідження фазового складу та кристалічної структури, магнітних і магніторезистивних властивостей.

Тришарові плівкові зразки на основі Ni, Co і Ду або Ві було сформовано

методом пошарової конденсації у вакуумі методом електронно-променевого випарування з варіюванням швидкості напilenня й температури підкладки. Осадження плівок проводили в діапазоні температур підкладки $T_n = 300\text{--}580$ К зі швидкістю $\omega = 0,5\text{--}2$ нм/с. Для контролю товщини плівок у процесі конденсації використовували метод кварцового резонатора. Для дослідження магнітних і магніторезистивних властивостей як підкладки застосовували пластини ситалу розміром $10\text{ мм} \times 10\text{ мм}$, а для електронно-мікроскопічних досліджень – монокристали NaCl і плівки-підкладки з вуглецю.

Термообробку всіх зразків проводили у вакуумній камері установки ВУП-5М у циклі «нагрівання → витримка впродовж 15 хв при $T_e \rightarrow$ охолодження до кімнатної температури» у інтервалі температур $T_e = 300\text{--}1000$ К.

Досліджували структурно-фазовий із використанням методів просвічуючої електронної мікроскопії та електроннографії (прилад ПЕМ-125К). Із метою збільшення точності розрахунків для розшифрування електроннограм було використане програмне забезпечення, розроблене в середовищі програмування LabVIEW. Вивчали магнітні властивості за кімнатної температури, використовуючи метод вібраційної магнітометрії (прилад VSM Lake Shore 7410), при різних кутах орієнтації зразків відносно прикладного зовнішнього магнітного поля. Магніторезистивні властивості досліджували методом високоточної резистометрії, застосовуючи 4-точкову схему при трьох взаємних орієнтаціях магнітного поля ($B = \pm 450$ мТл) до площини зразка і напрямку протікання струму.

Третій розділ «Фазовий склад та кристалічна структура плівкових зразків» складається з трьох підрозділів. У *першому підрозділі* наведені експериментальні результати досліджень фазового складу та кристалічної структури одношарових плівок Ni, Co, Dy та Bi у свіжосконденсованому стані та після термообробки до $T_e = 680\text{--}1000$ К.

Показано, що свіжосконденсовані одношарові плівки Co мають фазовий стан ГЦП-Co з невеликим умістом фази ГЦК-Co, це пояснюється дефектами пакування (ДП) у ГЦП-Co. Після термообробки за температур 800 і 1000 К та охолодження до кімнатної температури відбувається стабілізація ГЦК-фази, таким чином, плівки мають фазовий склад ГЦП-Co + ГЦК-Co. Одношарові плівки Ni як у свіжосконденсованому стані так і після термообробки до 700 К є однофазними та мають ГЦК-структуру.

Електроннографічні дослідження свіжосконденсованих одношарових плівок Dy показали, що їх фазовий склад перебуває у квазіаморфному або кристалічному стані, що залежить від ефективної товщини зразків. За ефективної товщини шарів $d_{Dy} < 15$ нм електроннографічно фіксується квазіаморфна фаза, а в разі збільшення товщини $d_{Dy} > 15$ нм у плівках відбуваються процеси кристалізації.

Аналіз результатів досліджень кристалічного Dy у свіжосконденсованому стані (рис. 1) показав, що плівки товщиною від 15 нм до 30 нм мають фазовий склад ГЦП-Dy + ОЦК-Dy₂O₃. Після термообробки до $T_e = 700$ К (рис. 1 в, г) вміст оксидної фази в зразках збільшується за рахунок взаємодії з атомами кисню із залишкової атмосфери, плівки швидко окислюються й повністю переходять в ОЦК-Dy₂O₃.

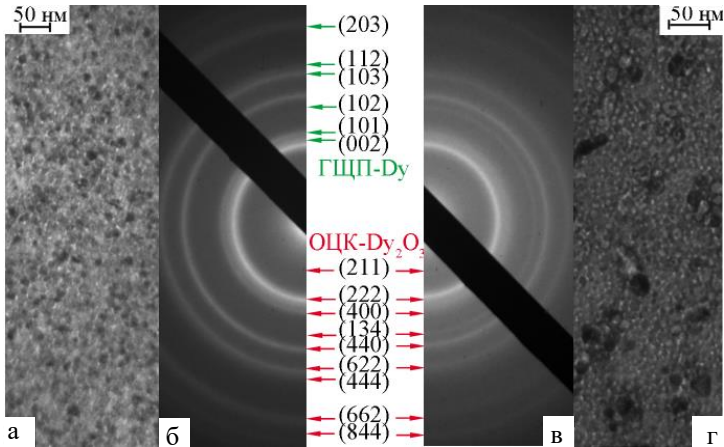


Рисунок 1 – Мікроструктури (а, г) та відповідні їм електронограми (б, в) від одношарової плівки Dy товщиною 25 нм у свіжосконденсованому стані (а, б) та після термообробки до 700 К (в, г)

Дослідження одношарових плівок Ві у свіжосконденсованому стані показали, що мікроструктура плівок залежить від температури підкладки під час конденсації (рис. 2). У діапазоні температур 473–533 К фіксується крапельна структура (рис. 2 в, г) за рахунок механізму конденсації «пара → рідина», а в разі зменшення температури від 450 К до 328 К відбувається зміна механізму конденсації росту плівки на «пара → кристал», при цьому структура плівки змінюється на полікристалічну (рис. 2 а, б). Після термообробки до 680 К у плівках фіксується незначне збільшення крапель та кристалітів. Дослідження фазового складу одношарових плівок Ві методом електронографії як у свіжосконденсованому стані так і після термообробки до 680 К показали, що плівки стабілізуються в ромбодричну фазу Ві (α -Ві).

У *другому підрозділі* наведені результати вивчення структурно-фазового стану тришарових плівок на основі Со та Ві. За товщини проміжного шару Ві $d_{Vi} < 15$ нм спостерігаються вкраплення Ві в матриці з Со, це пояснюється тим, що плівки Ві є структурно-несуцільними. Крім того, Ві має низьку температуру плавлення, що приводить до легкого проникнення атомів Со до шару Ві під час конденсації верхнього шару Со.

Свіжосконденсовані плівки мають фазовий склад ГЦП-Со + ГЦК-Со + α -Ві (рис. 3). Процес термообробки в діапазоні температур до 680 К спричиняє взаємодифузію шарів Со і Ві, що приводить до утворення зернистих структур в усьому об'ємі плівок. У разі підвищення температури відпалювання до 900 К у шарах Со збільшується концентрація ГЦК-фази. Структура проміжного шару Ві залежить від його товщини в загальній тришаровій системі. За товщини шару $d_{Vi} \leq 5$ нм відбувається повне окислення шару Ві з можливим переходом в аморфний стан (рис. 3 г, е), а зі збільшенням концентрації Ві фіксується тетрагональна фаза Vi_2O_3 (β - Vi_2O_3) (рис. 3 в, е).

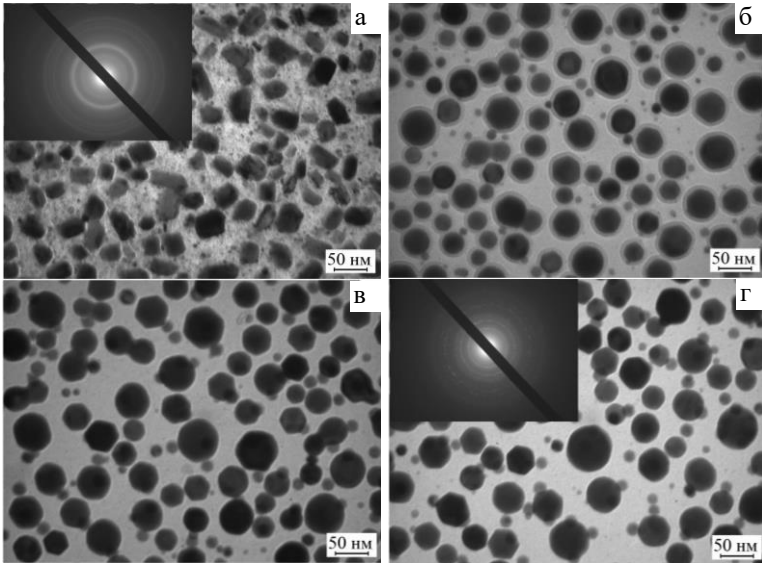


Рисунок 2 – Мікроструктури та відповідні їм електронограми свіжосконденсованих одношарових плівок Ві товщиною 20 нм, отриманих за різних температур підкладки: 328 К (а), 450 К (б), 473 К (в), 533 К (г)

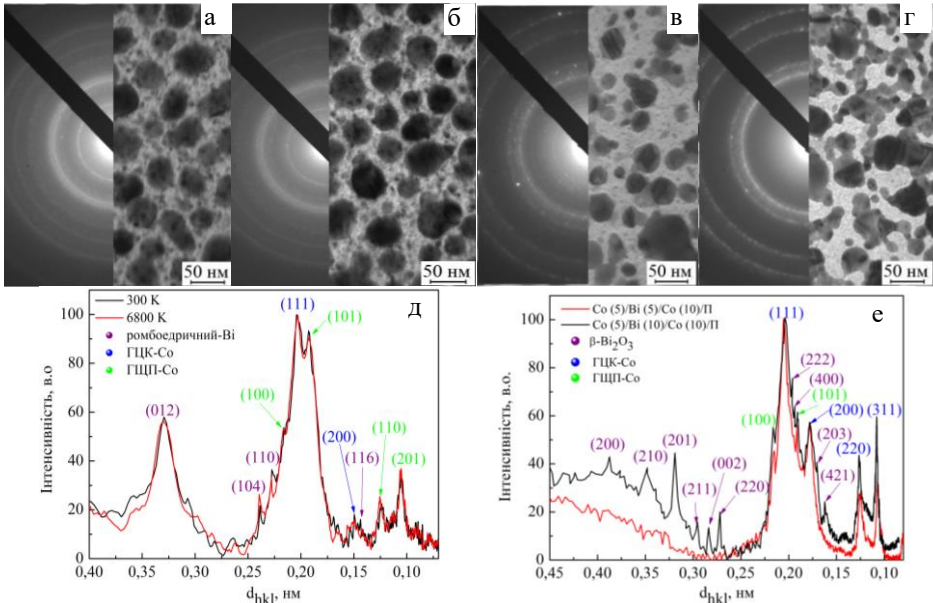


Рисунок 3 – Електронограми та відповідні їм мікроструктури для системи Co (5)/Bi (10)/Co (10)/П до (а) та після термообробки до 680 К (б), 900 К (в) та для Co (5)/Bi (5)/Co (10)/П після відпалювання до 900 К (г). Аналіз дифракційних зображень ПЕМ (д-е)

У *третьому підрозділі* розглянуті процеси фазоутворення в тришарових плівках на основі Ni (Co) та Dy. Як і у разі одношарових плівок за ефективних товщин менше ніж $d_{Dy} < 15$ нм на електроннограмах від свіжосконденсованих зразків і після термообробки до 700 і 800 К відсутні чітко виражені лінії, що відповідають відбиттям від кристалографічних площин Dy, а лише спостерігаються два гало, тобто фіксується квазіаморфна фаза. У випадку компонентів із феромагнітних металів спостерігаються ідентичні результати що й для одношарових плівок. Таким чином, плівкові зразки мають фазовий склад ГЦК-Ni + ка-Dy та ГЦП-Co + ГЦК-Co + ка-Dy.

У разі збільшення ефективної товщини проміжного шару з Dy (рис. 4, рис. 5) у свіжосконденсованому стані в плівках обох систем фіксуються лінії, що відповідають фазам ГЦП-Dy та ОЦК-Dy₂O₃.

Фазовий стан шарів Dy у тришарових системах після термообробки до 700, 800, 1000 К є двофазним: ГЦП-Dy + ОЦК-Dy₂O₃. Можливою причиною такого результату є те, що верхній шар відіграє роль захисного покриття, яке зменшує інтенсивність окислювальних процесів. У разі збільшення ефективної товщини прошарку з Dy у зразках зменшується вміст оксидної фази.

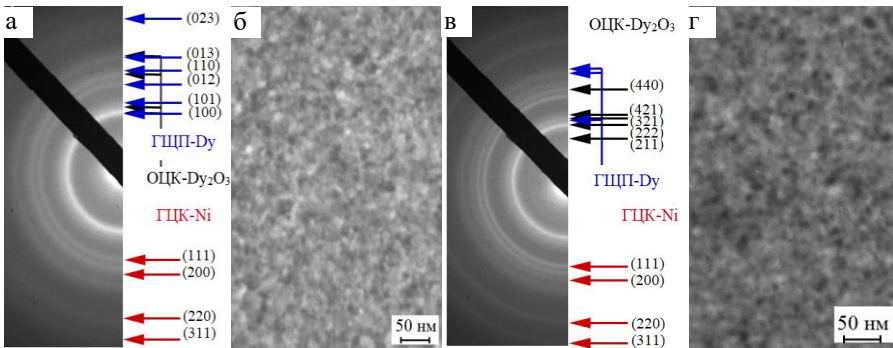


Рисунок 4 – Електроннограми (а, в) та відповідні їм мікроструктури (б, г) від плівкового зразка Ni (5)/Dy (20)/Ni (20)/П до (а, б) та після термообробки за температури 700 К (в, г)

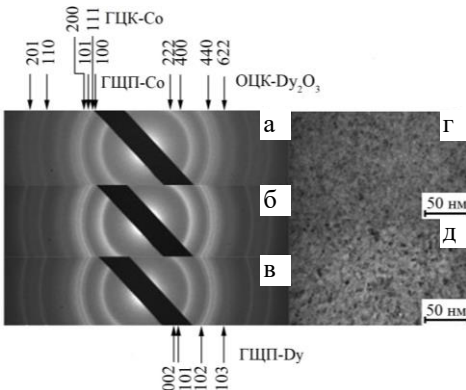


Рисунок 5 – Електроннограми (а-в) і відповідні їм мікроструктури (г, д) системи Co (5)/Dy (15)/Co (20)/П у свіжосконденсованому стані (а, г) і після термообробки за температур 800 К (б), 1000 К (в, д)

Четвертий розділ «Магнітні та магніторезистивні властивості» складається з п'яти підрозділів.

У *першому підрозділі* розглянуті результати досліджень одношарових плівок феромагнітних металів Ni і Co. Показано, що для плівок як у свіжосконденсованому стані, так і після термообробки до 700 К (Ni) та 1000 К (Co) виявляється анізотропний характер залежності МО від прикладеного зовнішнього магнітного поля. Максимальні значення величини МО в обох випадках фіксуються в перпендикулярній геометрії вимірювання. Для плівок нікелю у свіжосконденсованому стані це значення становить 0,7 %, після термообробки 1,3 % за ефективної товщини плівки 25 нм. Для плівок кобальту у свіжосконденсованому стані максимальне значення МО становить 0,43 % ($d_{Co} = 15$ нм) та 0,37 % і 0,3 % – після термообробки до 800 і 1000 К відповідно.

Дослідження магнітних характеристик показали, що у випадку плівок Ni до термообробки у разі збільшення ефективної товщини зростає залишкова намагніченість, водночас насичення досягається за більших значень прикладеного зовнішнього магнітного поля. Після термообробки характер зміни залишкової намагніченості не змінюється. Для плівок Co у свіжосконденсованому стані і після термообробки до 800 К намагніченість насичення зростає у разі збільшення ефективної товщини. Залишкова намагніченість до термообробки не має чітко вираженого характеру розмірної залежності, а після відпалювання її величина збільшується із зростанням ефективної товщини.

Величина коерцитивної сили для плівок нікелю у свіжосконденсованому стані зростає у разі збільшення товщини від 0,95 мТл до 4,4 мТл. Термообробка не впливає значною мірою на величину B_c , максимальне значення становить 5,7 мТл. Для плівок кобальту до та після термообробки величина коерцитивної сили і характер її залежності від товщини майже не змінюються, максимальне значення становить 3,4 мТл до термообробки і 2,6 мТл – після термообробки фіксується для ефективної товщини 5 нм.

У *другому підрозділі* наведені результати дослідження магніторезистивних і магнітних властивостей тришарових плівок на основі Co та Du. Для дослідження величини МО було отримано дві серії зразків: Co (5)/Du (x)/Co (20)/П, Co (5)/Du (10)/Co (x)/П. Показано, що в тришарових плівках, незалежно від товщини проміжного шару Du і базового шару Co, за кімнатної температури вимірювання виявляється анізотропний характер магнітоопору (рис. 6).

Максимальні значення МО для обох серій зразків фіксуються в перпендикулярній геометрії вимірювання, коли Du перебуває в квазіаморфному стані. На рисунку 6 проілюстровано трансформацію польових залежностей МО при переході від перпендикулярної до поперечної геометрії з кроком 10° та вимірювання в поздовжній геометрії. Необхідно зазначити, що величини МО і B_c у разі переходу зменшуються на всьому інтервалі значень кутів. Такий результат дає підставу розглядати тришарові плівки як перспективні функціональні елементи датчиків положення. Величини магнітоопору та коерцитивної сили залежно від ефективної товщини шару Du та базового шару Co мають немонотонний характер в усіх геометріях вимірювання.

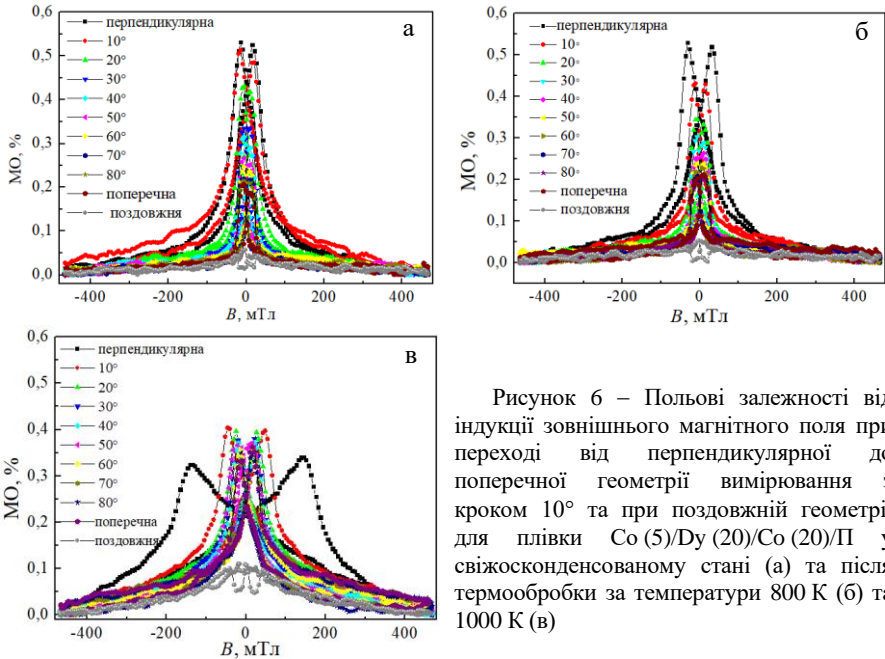


Рисунок 6 – Польові залежності від індукції зовнішнього магнітного поля при переході від перпендикулярної до поперечної геометрії вимірювання з кроком 10° та при поздовжній геометрії для плівки $\text{Co}(5)/\text{Du}(20)/\text{Co}(20)/\text{Pi}$ у свіжосконденсованому стані (а) та після термообробки за температури 800 К (б) та 1000 К (в)

Термообробка зразків до 800 К не приводить до зміни характеру залежностей, лише фіксується неістотне збільшення величин MO і B_c в усіх геометріях. Після подальшого відпалювання до 1000 К спостерігається неістотне зменшення величин MO і B_c у перпендикулярній геометрії та їх зростання у двох інших геометріях вимірювання.

Дослідження магнітних властивостей (рис. 7) показують, що у разі збільшення ефективної товщини прошарку Du відбувається зменшення величин залишкової намагніченості й намагніченості насичення. До того ж форма петель гістерезису не змінюється й аналогічна до одношарової плівки Co . Зростання B_c зі збільшенням d_{Du} обумовлено змішуванням атомів Co і Du на межах поділу шарів під час конденсації та збільшення концентрації гранул Co . Процес термообробки до 800 К приводить до збільшення значень B_c , M_s і M_r і це спричинює незначну зміну форм петель гістерезису для обох серій зразків.

Порівняння величин B_c , M_s і M_r тришарових плівок сумарною товщиною шарів Co 25 нм з одношаровою плівкою кобальту такої самої товщини свідчить, що коерцитивність для тришарових плівок збільшилась, а значення M_s і M_r зменшилися.

У третьому підрозділі наведені результати дослідження магніторезистивних і магнітних властивостей тришарових плівок на основі Ni та Du (рис. 8). Для тришарових плівок зберігається анізотропний характер MO , і додавання прошарку Du не змінює форми магніторезистивних кривих. Наявність немагнітних прошарків може приводити до появи непрямой обмінної взаємодії між феромагнітними шарами,

тобто за зміни товщини шару Dy може відбуватися перехід від феромагнітної до антиферомагнітної взаємодії магнітних шарів і навпаки. Водночас характер залежності MO і B_c від товщини прошарку є немонотонним.

Термообробка зразків до 700 К призводить до зменшення величини MO . У відпалених системах інтерфейс між ФМ та немагнітними шарами став більш дифузним, оскільки атоми Ni проникають через шар Dy, розмиваючи межі поділу. Максимальне значення MO становить за $d_{Dy} = 20$ нм у перпендикулярній геометрії 1,7 %, що в 2,4 раза більше, ніж для тонкої плівки Ni 25 нм у свіжосконденсованому стані (0,7 %).

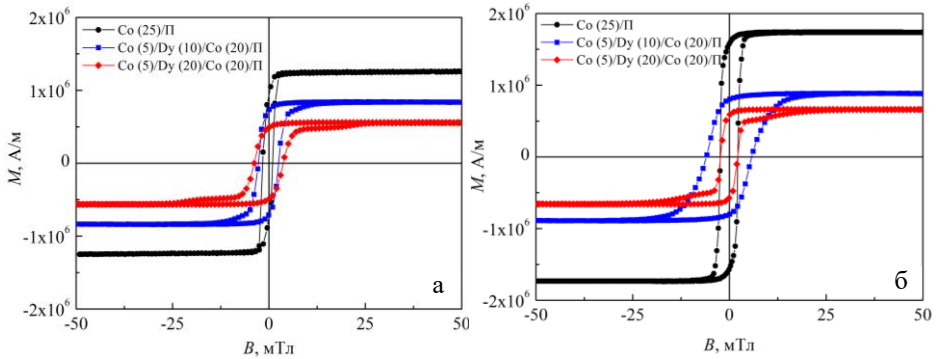


Рисунок 7 – Залежність намагніченості від прикладеного зовнішнього магнітного поля для одношарової плівки Co та тришарової плівкової системи Co (5)/Dy (x)/Co (20)/Pi до (а) та після термообробки за температури 800 К (б)

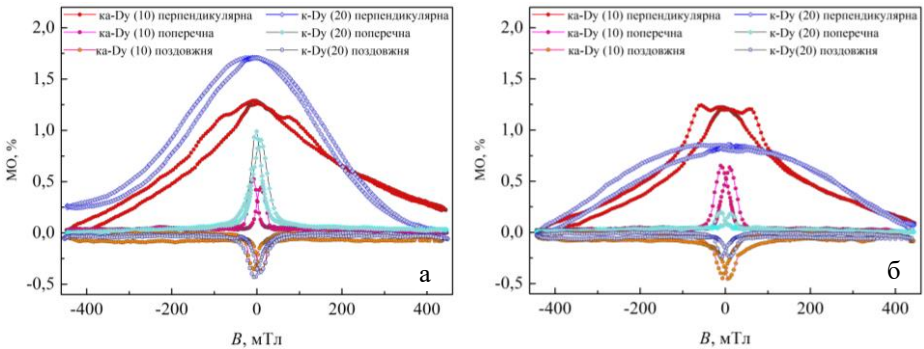


Рисунок 8 – Залежність величини MO від індукції зовнішнього магнітного поля пліткових систем: Ni (5)/Dy (x)/Ni (20)/Pi до (а) та після термообробки (б) при трьох геометріях вимірювання. На легенді зазначені товщини проміжних шарів систем

Дослідження магнітних властивостей тришарових плівок Ni (5)/Dy (x)/Ni (20)/Pi показали, що вони визначаються структурно-фазовим станом шару Dy (рис. 9). Плівки з прошарком із квазіаморфного Dy характеризуються меншою коерцитивністю та більшою намагніченістю

насичення, ніж плівки, в яких шари Dy перебувають у кристалічному стані. Оскільки кристалічний прошарок диспрозію має більшу товщину, ніж квазіаморфний прошарок, то на петлях гістерезису спостерігаються перегини, обумовлені пошаровим перемагнічуванням. Відпалювання до 700 К приводить до незначного зростання коерцитивної сили та намагніченості насичення.

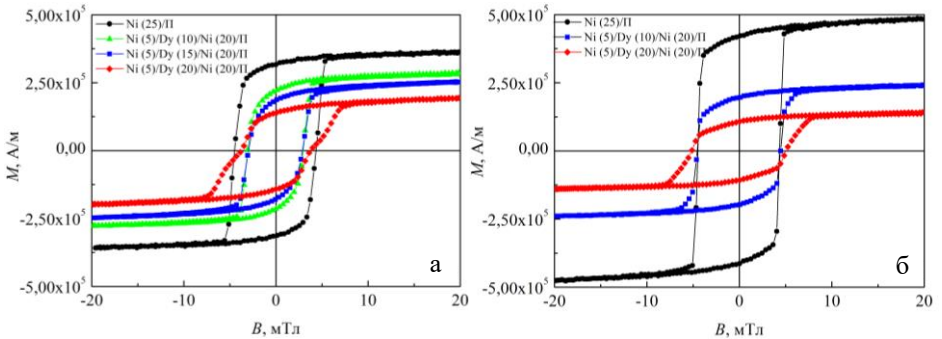


Рисунок 9 – Залежність величини намагніченості від прикладеного зовнішнього магнітного поля для тришарових плівкових систем у свіжосконденсованому стані Ni (5)/Dy (x)/Ni (20)/П (а) та після термообробки за температури 700 К (б)

У четвертому підрозділі наведені результати дослідження магніторезистивних і магнітних властивостей тришарових плівок на основі Со та Ві. Для дослідження було взято плівки з кристалічною структурою, отримані на підігрійтій до 450 К підкладці. Для тришарових плівок Со/Ві/Со спостерігається також анізотропний характер залежності (рис. 10).

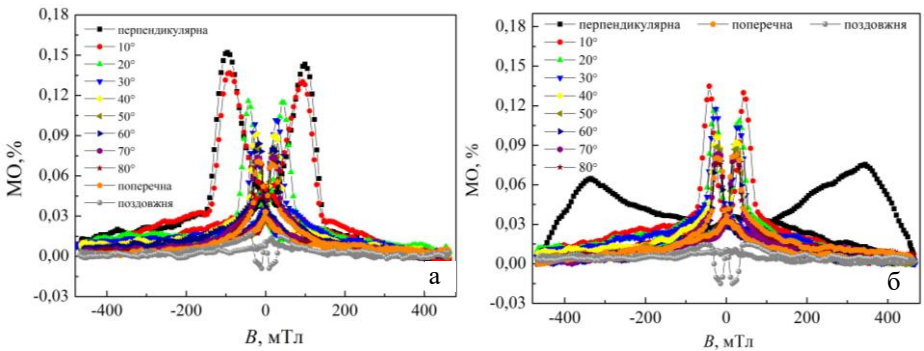


Рисунок 10 – Польові залежності від індукції зовнішнього магнітного поля при переході від перпендикулярної до поперечної геометрії вимірювання з кроком 10° та при поздовжній геометрії для плівки Со (5)/Ві (15)/Со (10)/П до (а) та після термообробки до 680 К (б)

Значення величини МО становлять 0,15 % у перпендикулярній геометрії та 0,05 % – в поперечній і дещо збільшуються після термообробки за температури 680 К. Це пояснюється зростанням розмірів гранул Ві при відпалюванні. Невисокі значення величини МО тришарових плівок можна

пояснити їх високим опором. Характер залежності величини M_0 і B_c від ефективної товщини прошарку Ві має немонотонний характер як у свіжосконденсованих зразках, так і після термообробки.

Дослідження магнітних властивостей показали, що петлі гістерезису мають форму, близьку до прямокутної з відносно невисокими значеннями коерцитивності B_c . Збільшення товщини шару Ві приводить до зменшення величин залишкової намагніченості та намагніченості насичення (рис. 11), коефіцієнт прямокутності зростає. Процес термообробки за температури 680 К дещо змінює характер кривих.

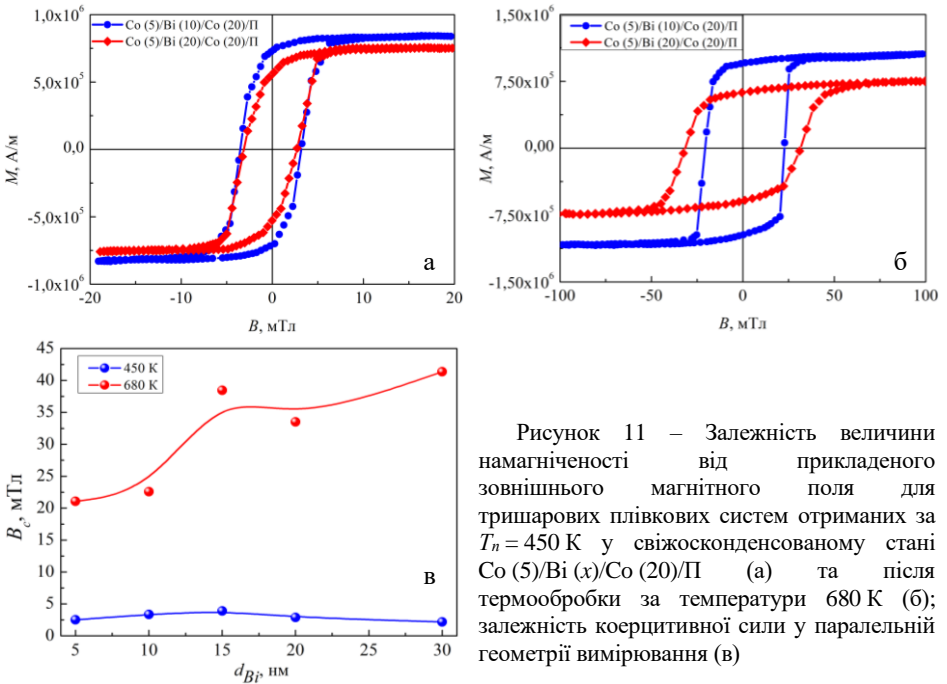


Рисунок 11 – Залежність величини намагніченості від прикладеного зовнішнього магнітного поля для тришарових плівкових систем отриманих за $T_n = 450\text{ K}$ у свіжосконденсованому стані $\text{Co}(5)/\text{Bi}(x)/\text{Co}(20)/\text{P}$ (а) та після термообробки за температури 680 K (б); залежність коерцитивної сили у паралельній геометрії вимірювання (в)

Значення M_s і M_r після термообробки зросли і стали приблизно в 1,5 раза вищими за меншої товщини шару Ві ($d_{\text{Bi}} = 5\text{--}10\text{ nm}$). Вплив термообробки слабкий, особливо за $d_{\text{Bi}} = 30\text{ nm}$. На рисунку 12 бачимо, що коерцитивність тришарових систем менша ніж 5 mT у свіжосконденсованому стані та за збільшення товщини шару Ві не відбувається її істотної зміни. Термовідпалювання зразків приводить до значного збільшення B_c , що може бути пояснено розміщенням доменних стінок у результаті перемішування між шарами Ві та Со й утворення гранульованих структур в усьому об'ємі систем. Крім того, збільшення B_c супроводжується зміною форми петлі гістерезису (вони стають більш квадратними). Коерцитивність досягає максимального значення – 41 mT за $d_{\text{Bi}} = 30\text{ nm}$.

У *п'ятому підрозділі* наведені обговорення результатів із точки зору можливого використання тришарових плівок як функціональних елементів. На початку підрозділу подані результати дослідження анізотропії магнітних властивостей у площині плівки в паралельній геометрії вимірювання для одно- і тришарових плівок. Типові залежності M_r від напруженості зовнішнього магнітного поля в полярних координатах показано на рисунку 12. Аналіз одержаних результатів свідчить про те, що за певних товщин шарів систем на основі Ni і Dy та Co і Dy можна використовувати для розроблення чутливих елементів індукційних датчиків положення.

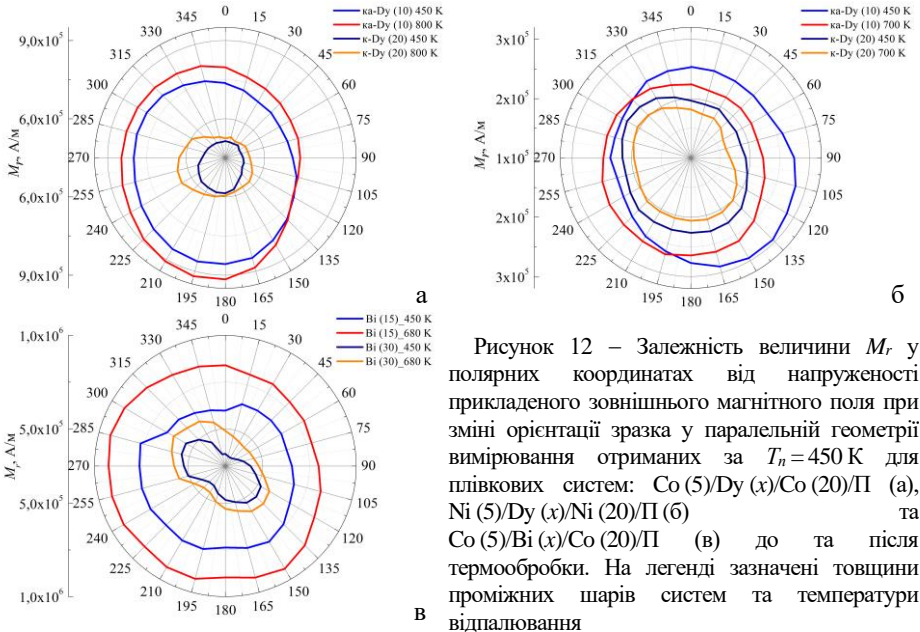


Рисунок 12 – Залежність величини M_r у полярних координатах від напруженості прикладеного зовнішнього магнітного поля при зміні орієнтації зразка у паралельній геометрії вимірювання отриманих за $T_n = 450$ К для плівкових систем: Co(5)/Dy(x)/Co(20)/П (а), Ni(5)/Dy(x)/Ni(20)/П (б) та Co(5)/Bi(x)/Co(20)/П (в) до та після термообробки. На легенді зазначені товщини проміжних шарів систем та температури відпалювання

Нами також було розраховано характер залежності коерцитивної сили від кута β при переході від паралельної до перпендикулярної геометрії вимірювання за формулою (1):

$$B_c(\alpha) = \frac{B_c(0)}{\cos(\beta)}, \quad (1)$$

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

З даних, наведених на рисунку 13 випливає, що експериментальні дані про B_c , визначені з петель гістерезису, найкраще узгоджуються з розрахунковими для системи на основі Co і Dy. Це означає, що можна досить точно в таких системах спрогнозувати величину коерцитивної сили залежно від кута положення чутливих елементів у зовнішньому магнітному полі від 0° до 90° при переході від паралельної геометрії вимірювання до перпендикулярної.

Необхідно зазначити, що характер залежності МО від зміни орієнтації зразка при переході від перпендикулярної до поперечної геометрії вимірювання для плівок Co/Bi/Co в інтервалі кутів від 0° до 90° , а для Co/Dy/Co – від 30° до 90° близький до лінійного (рис. 14), що підтверджує перспективність використання таких систем як чутливих елементів індукційних датчиків.

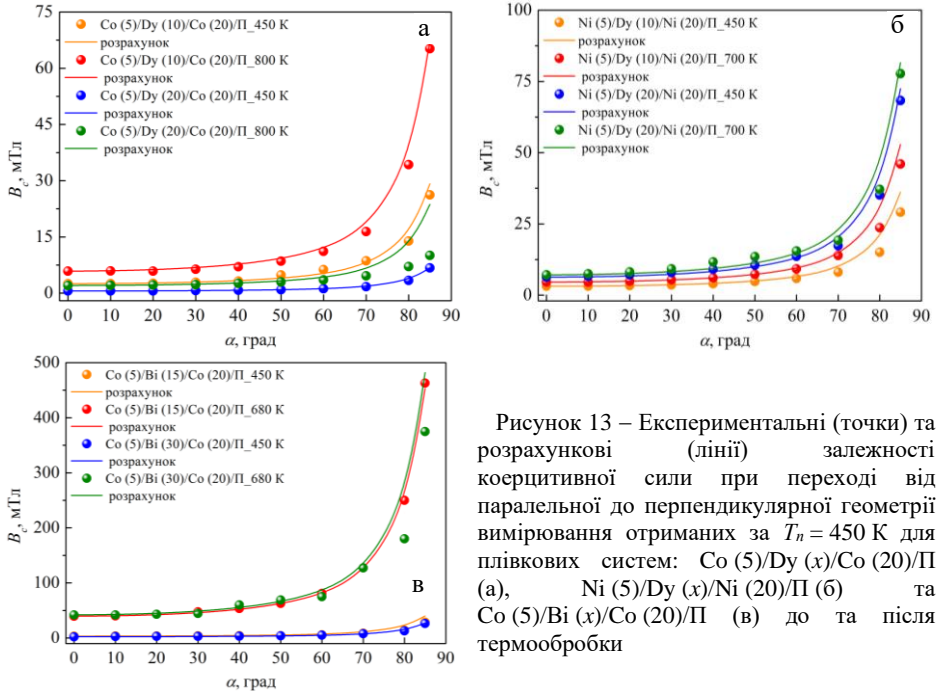


Рисунок 13 – Експериментальні (точки) та розрахункові (лінії) залежності коерцитивної сили при переході від паралельної до перпендикулярної геометрії вимірювання отриманих за $T_n = 450$ К для плівкових систем: Co (5)/Dy (x)/Co (20)/Pi (а), Ni (5)/Dy (x)/Ni (20)/Pi (б) та Co (5)/Bi (x)/Co (20)/Pi (в) до та після термообробки

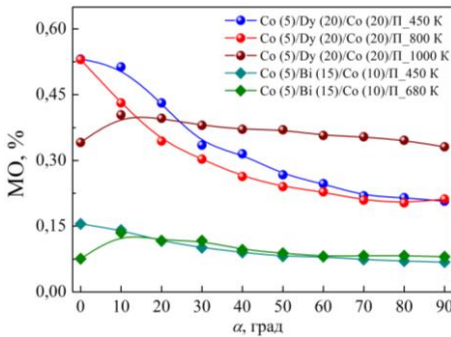


Рисунок 14 – Залежність величини магнітоопору від прикладеного зовнішнього магнітного поля при переході від перпендикулярної до поперечної геометрії вимірювання з кроком та при подовжній геометрії для плівок за $T_n = 450$ К у свіжосконденсованому стані та після термообробки: Co (5)/Dy (20)/Co (20)/Pi та Co (5)/Bi (15)/Co (10)/Pi

Експериментальні дані про величину МО було використано для розрахунку величини чутливості плівок до магнітного поля з використанням співвідношення (2):

$$S_B = |(\Delta R/R(B_S)_{\max})/\Delta B|, \quad (2)$$

де $(\Delta R/R(B_s))_{\max}$ – максимальне значення магнітоопору; ΔB – зміна магнітної індукції від насичення (або максимального значення) B_s до розмагнічування B_c , величина якої фактично дорівнює $\Delta B = B_s + B_c$.

Значення чутливості є важливим параметром із точки зору здатності сенсора реагувати на зміну магнітного поля не залежно від геометрії вимірювання. Для плівок Ni/Dy/Ni величина S_B має найвищі значення серед досліджених систем та може досягати 2,5–4 %/Тл. Найнижчі значення (~1 %/Тл) спостерігаються для системи на основі Co і Ві.

З точки зору можливості використання плівкових систем, досліджуваних у роботі, як середовища запису інформації одним з основних параметрів є коефіцієнт прямокутності ($KП = M_r/M_s$). У таблиці 1 наведено розрахункові дані.

Таблиця 1

Залежність величини коефіцієнта прямокутності

Коефіцієнт прямокутності			Примітка
Co/Dy/Co	Ni/Dy/Ni	Co/Bi/Co	
0,7–0,87	0,63–0,85	0,68–0,86	свіжосконденсовані
0,67–0,86	0,76–0,82	0,8–0,91	відпалені

З цих даних випливає, що за рахунок відпалювання значення КП дещо збільшується, а його найвищі значення спостерігаються для системи Co/Bi/Co.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі було вирішено задачі з комплексного дослідження фазового складу та кристалічної структури, магніторезистивних і магнітних властивостей приладових структур у вигляді тришарових плівкових систем на основі Ni або Co з додаванням проміжних шарів із Dy або Ві. З огляду на це можна зробити такі висновки:

1. Для одношарових плівок Ni, Co, Dy та Ві виявляються такі особливості їх структурно-фазового стану:

- плівки Ni у свіжосконденсованому стані та після відпалювання до 700 К є однофазними і мають ГЦК-структуру з параметром решітки близьким до масивних зразків;

- плівки Co у свіжосконденсованому стані та після термообробки за температур 800 і 1000 К мають фазовий склад ГЦП-Co + ГЦК-Co;

- залежно від ефективної товщини одношарових плівок Dy їх фазовий склад відповідає квазіаморфному ($d_{Dy} < 15$ нм) та за збільшення товщини – кристалічному; свіжосконденсовані плівки ($d_{Dy} > 15$ нм) мають фазовий склад ГЦП-Dy + ОЦК-Dy₂O₃; термообробка до 700 К призводить до повного окислення плівок до ОЦК-Dy₂O₃;

- плівки Ві у свіжосконденсованому стані та після термообробки до 680 К є однофазними та відповідають фазі ромбодричного Ві; структура плівкових зразків залежить від температури підкладки під час конденсації: при $T_n = 328$ –450 К

спостерігається кристалічна структура, при $T_n = 473\text{--}533\text{ K}$ – спостерігається крапельна структура.

2. Фазовий склад тришарових плівок до та після термообробки визначається фазовим складом окремих компонентів системи:

- у свіжосконденсованому стані в системі Co/Vi/Co фіксуються фази ГЦП-Co, ГЦК-Co, α -Vi; після термообробки до 680 K відбувається часткове окислення шарів Vi;

- після термообробки до 900 K за товщини $d_{Vi} \leq 5\text{ nm}$ відбувається повне окислення шару Vi з переходом у аморфний стан, а зі збільшенням товщини шару на основі Vi фіксується тетрагональна фаза Vi_2O_3 ;

- у пліткових системах на основі Ni або Co та Dy ($d_{Dy} < 15\text{ nm}$) до і після термообробки фазовий склад є таким: ГЦК-Ni + ka-Dy та ГЦП-Co + ГЦК-Co + ka-Dy;

- у разі збільшення ефективної товщини проміжного шару з Dy він стає кристалічним (у свіжосконденсованому стані та після термообробки в плівках обох систем фіксуються лінії, що відповідають фазам ГЦП-Dy та ОЦК-Dy $_2$ O $_3$).

3. Дослідження магнітних властивостей одношарових плівок Co і Ni та тришарових систем на їх основі з додаванням Dy або Vi засвідчило таке:

- в одношарових плівках Co до та після термообробки не спостерігається чітко вираженої розмірної залежності магнітних характеристик, у плівках Ni до термообробки розмірний характер залежності магнітних характеристик від ефективної товщини плівок більш виражений;

- у тришарових пліткових системах на основі Ni або Co та Dy з $d_{Dy} > 20\text{ nm}$ спостерігаються перегини на петлях гістерезису, що свідчить про пошарове перемагнічування; плівки з прошарком із квазіаморфного Dy мають меншу коерцитивність;

- у тришарових плівках Co/Vi/Co до термообробки коерцитивність не залежить від товщини прошарку з Vi;

- збільшення товщини шару Vi від 5 nm до 30 nm призводить до зменшення величин намагніченості насичення та залишкової намагніченості;

- після термообробки в одно- і тришарових плівках у більшості випадків відбувається зростання величини коерцитивної сили, намагніченості насичення та залишкової намагніченості;

- експериментальні дані про залежність величини коерцитивної сили від кута переходу від паралельної до перпендикулярної геометрії вимірювання кількісно узгоджуються з розрахунковими на підставі закону анізотропії коерцитивної сили; найкращий збіг спостерігається для системи на основі Co і Dy, що дозволяє розглядати їх як чутливі елементи індукційних датчиків;

- найвищі значення коефіцієнта прямокутності 0,8–0,91 спостерігаються для системи Co/Vi/Co після термообробки.

4. За допомогою досліджень магніторезистивних властивостей одно- та тришарових плівок визначено такі закономірності:

- для всіх зразків фіксується анізотропний характер магнітоопору за кімнатної температури вимірювання;
- для тришарових плівок залежність магнітоопору від товщини квазіаморфного шару Dy має немонотонний характер;
- у разі переходу прошарку Dy із квазіаморфного стану в кристалічний зникає немонотонний характер залежностей MO від ефективної товщини Dy;
- максимальні значення MO для систем на основі Ni або Co та Dy спостерігаються в перпендикулярній геометрії вимірювання, коли Dy перебуває в квазіаморфному стані;
- для системи на основі Co та Bi максимальні значення спостерігаються за найбільших його товщин у системі в перпендикулярній геометрії вимірювання;
- при переході від перпендикулярної до поперечної геометрії вимірювання для систем Co/Bi/Co в інтервалі кутів від 0° до 90°, а для Co/Dy/Co – від 30° до 90° встановлено близький до лінійного характер залежності MO від зміни орієнтації зразка, що дозволяє розглядати такі плівкові системи як чутливі елементи індукційних датчиків;
- найвищі значення чутливості до зовнішнього магнітного поля (2,5–3 %/Тл) для плівкової системи Ni/Dy/Ni дозволяють розглядати її як функціональний елемент датчика реагування на зміну магнітного поля незалежно від геометрії вимірювання.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

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 // *Technical Physics*. – 2014. – Vol. 59. – P. 1644–1649.
2. The phase composition and magnetic properties of film systems based on Fe (Co) and Gd (Dy) / S.I. Vorobiov, I.V. Cheshko, A.M. Chornous, H. Shirzadfar, **O.V. Shutylieva** // *Journal of Nano- and Electronic Physics*. – 2014. – Vol. 6. – P. 02022–1–8.
3. Effect of separated layer thickness on magnetoresistance and magnetic properties of Co/Dy/Co and Ni/Dy/Ni film systems / T.M. Shabelnyk, **O.V. Shutylieva**, S.I. Vorobiov, I.M. Pazukha, A.M. Chornous // *International Journal of Modern Physics B*. – 2018. – Vol. 32. – P. 1750275–1–10.
4. Modification of magnetoresistance and magnetic properties of Ni thin films by adding Dy interlayer / S.I. Vorobiov, T.M. Shabelnyk, **O.V. Shutylieva**, I.M. Pazukha, A.M. Chornous // *Materials Research Express*. – 2018. – Vol. 5. – P. 036412–1–12.
5. The annealing effect on structure, magnetoresistance and magnetic properties of Co/Bi/Co thin films / S.I. Vorobiov, **O.V. Shutylieva**, I.M. Pazukha, A.M. Chornous // *European Physical Journal Plus*. – 2016. – Vol. 131. – P. 203–1–7.
6. Магнетні та магнеторезистивні властивості плівок феромагнітних металів / С.І. Воробйов, Я.М. Литвиненко, І.О. Шпетний, **О.В. Шутильєва**,

А.М. Черноус // *Металлофиз. новейшие технол.* – 2015. – Т. 37, № 8. – С. 1049–1062.

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

8. Vorobiov S.I. Study of magnetoresistive properties of thin film systems based on Co and Gd or Dy / S.I. Vorobiov, **O.V. Shutylieva**, I.O. Shpetnyi, A.M. Chornous // *International Conference of the Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems, ICPTTFN-XIV.* – Ivano-Frankivsk, 2013. – P. 424.

9. Shutylieva O. Influence of the heat treatment on the magnetoresistive properties of film systems based on Co and Cr, Bi or Gd / **O. Shutylieva**, D. Kondrakhova, S. Vorobiov, A. Chornous // *International conference of students and young researchers in theoretical and experimental physics, Heureka-2013.* – Lviv, 2013. – P. A30.

10. Костян І.М. Дослідження структурно-фазового стану і магніторезистивних властивостей плівкових систем на основі Co та Bi / І.М. Костян, **О.В. Шутилєва**, І.О. Шпетний // *ФЕЕ-2013: матеріали та програма науково-технічної конференції.* – Суми : СумДУ, 2013. – С. 103.

11. Шутилєва О.В. Дослідження магнітних властивостей тришарових плівкових систем на основі Co та Dy / **О.В. Шутилєва**, Х. Ширзадфар, С.І. Воробйов // *ФЕЕ-2014: матеріали та програма науково-технічної конференції.* – Суми : СумДУ, 2014. – С. 115.

12. Shutileva O.V. Magnetic properties three-layers film systems based on Co and Gd or Dy / S.I. Vorobiov, **O.V. Shutylieva**, A.M. Chornous // *International Conference of the Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems, International research and practice conference «Nanotechnology and nanomaterials».* – Yaremche-Lviv, 2014. – P. 271.

13. Shutileva O.V. Structural phase state and magnetic properties of three-layer film systems based on Ni/Dy/Ni / **O.V. Shutylieva**, S.I. Vorobiov // *International conference of students and young researchers in theoretical and experimental physics, Heureka-2014.* – Lviv, 2014. – P. 123.

14. Шутилєва О.В. Дослідження магнітних властивостей тришарових плівкових систем на основі Ni та Dy / О.В. Шутилєва // *ФЕЕ-2015: матеріали та програма науково-технічної конференції.* – Суми : СумДУ, 2015. – С. 146.

15. Shutileva O.V. Magnetic properties of three-layers film systems based on Ni and Dy / S. I. Vorobiov, **O.V. Shutylieva**, A.M. Chornous // *3-rd International research and practice conference «Nanotechnology and Nanomaterials» (NANO-2015)* – Yaremche-Lviv, 2015. – P. 271.

16. Шабельник Т.М. Структурно-фазовий стан, магнітні та магніторезистивні властивості тришарових плівок на основі Ni та Dy / Т.М. Шабельник, **О.В. Шутилєва**, С.І. Воробйов // *ФЕЕ-2016: матеріали та програма науково-технічної конференції.* – Суми : СумДУ, 2016. – С. 126-127.

17. Шабельник Т.М. Вплив товщини немагнітного прошарку із Ду на магніторезистивні властивості тришарових плівок Ni/Du/Ni / Т.М. Шабельник, **О.В. Шутилєва** // ФЕЕ-2017: матеріали та програма науково-технічної конференції. – Суми : СумДУ, 2017. – С. 102.

АНОТАЦІЯ

Шутилєва О. В. Фазовий склад та магніторезистивні і магнітні властивості приладових структур на основі Ni і Co та Ду або Ві. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.01 – фізика приладів, елементів та систем. – Сумський державний університет, Суми, 2021.

Дисертаційна робота присвячена комплексному дослідженню впливу структурно-фазового стану на магнітні й магніторезистивні властивості приладових структур на основі плівкових систем із перехідних феромагнітних (Ni або Co) металів і рідкоземельного Ду або Ві та при різній орієнтації зразків у зовнішньому магнітному полі.

Встановлено, що для всіх досліджуваних плівкових систем фіксується анізотропний характер магнітоопору за кімнатної температури вимірювання. Показано, що при зміні товщини прошарку з ка-Ду залежність магнітоопору і коерцитивної сили виявляє немонотонний характер, який зникає при переході у кристалічний стан.

Дослідження магнітних властивостей показали, що після термообробки у тришарових плівках у більшості випадків відбувається зростання величини коерцитивної сили, намагніченості насичення та залишкової намагніченості. У тришарових плівках Co/Vi/Co у свіжосконденсованому стані коерцитивність не залежить від товщини прошарку з Ві, після відпалювання до 680 К її значення зростає зі збільшенням ефективної товщини Ві.

Показано можливість практичного використання результатів дослідження для розробки функціональних елементів індукційних датчиків положення, анізотропних магніторезистивних датчиків положення і кута повороту, магнітного середовища запису інформації, що будуть мати стабільні робочі характеристики в широкому діапазоні температур.

Ключові слова: тришарові плівки, процеси фазоутворення, рідкоземельний метал, чутливий елемент датчика, магнітоопір, коерцитивна сила, залишкова намагніченість, намагніченість насичення, коефіцієнт прямокутності.

АННОТАЦИЯ

Шутылева О. В. Фазовый состав, магниторезистивные и магнитные свойства приборных структур на основе Ni и Co и Dy или Bi. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – физика приборов, элементов и систем. – Сумский государственный университет, Сумы, 2021.

Диссертация посвящена комплексному исследованию влияния структурно-фазового состояния на магнитные и магниторезистивные свойства приборных структур на основе пленочных систем с переходных ферромагнитных (Ni или Co) металлов и редкоземельного Dy или Bi и при разной ориентации образцов во внешнем магнитном поле.

Установлено, что для всех исследуемых пленочных систем фиксируется анизотропный характер магнетосопротивления при комнатной температуре измерения. Показано, что при изменении толщины слоя с ка-Dy зависимость магнитосопротивления и коэрцитивной силы проявляет немонотонный характер, который исчезает при переходе в кристаллическое состояние.

Исследование магнитных свойств показали, что после термообработки в трехслойных пленках в большинстве случаев происходит увеличение величины коэрцитивной силы, намагниченности насыщения и остаточной намагниченности. В трехслойных пленках Co/Bi/Co в свежосконденсированном состоянии коэрцитивность не зависит от толщины слоя с Bi, после отжига до 680 K ее значение возрастает с увеличением эффективной толщины Bi.

Показана возможность практического использования результатов исследования для разработки функциональных элементов индукционных датчиков положения, анизотропных магниторезистивных датчиков положения и угла поворота, магнитной среды записи информации, будут иметь стабильные рабочие характеристики в широком диапазоне температур.

Ключевые слова: трехслойные пленки, процессы фазообразования, редкоземельный металл, чувствительный элемент датчика, магнитосопротивление, коэрцитивная сила, остаточная намагниченность, намагниченность насыщения, коэффициент прямоугольности.

ABSTRACT

Shutylieva O. V. The phase composition, magnetoresistive and magnetic properties of devices structures based on Ni and Co and Dy or Bi.- Manuscript.

PhD thesis submitted for the degree of a candidate of physical and mathematical sciences (doctor of philosophy), speciality 01.04.01 – «Physics of devices, elements and systems». – Sumy State University, Sumy, 2021.

The PhD thesis is devoted to a complex study of the influence of the structural-phase state on the magnetic and magnetoresistive properties of devices structure based

on film systems of transition ferromagnetic (Ni or Co) metals and rare earth Dy or Bi and to establish the influence of sample orientation in an external magnetic field.

The interconnection between the features of the structural-phase state of the structures of devices in the form of three-layer film systems and their magnetic and magnetoresistive properties has been established. The phase composition of three-layer films based on Co and Bi in the as-deposited state corresponds to hcp-Co, fcc-Co, and rhombohedral-Bi. Three-layer films based on Ni or Co and Dy ($d_{Dy} < 15$ nm) before and after heat treatment, the phase composition is as follows: fcc-Ni + qa-Dy and hcp-Co + fcc-Co + qa-Dy.

It is established that for all investigated film systems the anisotropic character of the magnetoresistance at room temperature of measurement is fixed. The maximum MR values for systems based on Ni or Co and Dy are observed in the perpendicular measurement geometry when Dy is in the quasi amorphous state. For a system based on Co and Bi, the maximum values are observed at its largest thicknesses in the system in the perpendicular geometry of the measurement. When the thickness of the layer changes from qa-Dy, the dependence of the magnetoresistance and coercive force reveals a nonmonotonic character, which disappears during the layer Dy transition to the crystalline state.

Studies of magnetic properties have shown that after heat treatment in three-layer films in most cases there is an increase in the value of coercive force, saturation magnetization, and residual magnetization. In three-layer Co/Bi/Co films in an as-deposited state, the coercivity does not depend on the thickness of the Bi layer and after annealing to 680 K, its value increases with increasing effective Bi thickness.

The possibility of practical use of research results for the development of functional elements of induction position sensors, anisotropic magnetoresistive position, and angle sensors, magnetic medium of information recording, which will have stable operating characteristics in a wide temperature range, is shown.

Keywords: three-layer films, phase formation processes, rare earth metal, sensor sensing element, magnetoresistance, coercive force, residual magnetization, saturation magnetization, squareness ratio.

Підписано до друку 25.08.2021.
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.